МЕХАНІКО-ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра механіки і проектування машин

В. І. Мороз, О. В. Братченко, О. А. Логвіненко

ОСНОВИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЕКТУВАННЯ

Конспект лекцій

Харків – 2019

Мороз В. І., Братченко О. В., Логвіненко О. А. Основи автоматизації проектування: Конспект лекцій. – Харків : УкрДУЗТ, 2019. – 98 с.

Містить систематизоване висвітлення головних проблем і можливих шляхів створення нової техніки, основних положень сучасної методології оптимізаційного проектування і конструювання транспортних технічних засобів, особливостей розробки і використання відповідних САПР.

Рекомендується для студентів усіх форм навчання спеціальності «Теплоенергетика» (освітня програма: «Теплоенергетика»).

Іл. 33, бібліогр.: 6 назв.

Конспект лекцій розглянуто і рекомендовано до друку на засіданні кафедри механіки і проектування машин 11 лютого 2019 р., протокол № 10.

Рецензент

старш. викл. П. В. Рукавішников

В. І. Мороз, О. В. Братченко, О. А. Логвіненко

ОСНОВИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЕКТУВАННЯ

Конспект лекцій

Відповідальний за випуск Логвіненко О. А.

Редактор Еткало О. О.

Підписано до друку 12.04.19 р.

Формат паперу 60x84 1/16. Папір писальний.

Умовн.-друк. арк. 4,25. Тираж 50. Замовлення №

Видавець та виготовлювач Український державний університет залізничного транспорту,
61050, Харків-50, майдан Фейєрбаха, 7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6100 від 21.03.2018 р.

ЗМІСТ

Вступ…… 5
1 Автоматизація проектування – основний елемент сучасної методології автоматизованого проектування…. 6
1.1 Роль автоматизації проектування у створенні систем автоматизованого проектування нових технічних засобів……... 6
1.2 Забезпечення найважливіших техніко-економічних показників при автоматизації проектування……. 11
1.3 Особливості використання автоматизації проектування на різних стадіях розробки проектів нових технічних засобів……... 17
1.4 Загальні підходи до виявлення помилок і контролю конструкторської документації…….. 20
2 Підходи, стратегії та методи автоматизованого проектування……. 23
2.1 Елементи сучасної методології автоматизації проектування…… 23
2.2 Автоматизація функціонального і структурного проектування технічних засобів……. 33
2.3 Роль математичного моделювання при автоматизації проектування технічних засобів……. 39
2.4 Сучасні підходи до розробки математичних моделей механічних систем технічних засобів…… 47
2.5 Основи автоматизації проектування сучасних систем віброзахисту технічних засобів…….. 52
3 Автоматизація оптимізаційного проектування технічних засобів…….. 58
3.1 Постановка і вирішення задачі оптимізаційного проектування…… 58
3.2 Сучасні методи оптимізації……. 63
3.3 Оптимізація структури механізмів технічних засобів та приклади їх оптимізаційного проектування…….. 68
4 Особливості використання автоматизації проектування у сучасних системах автоматизованого проектування (САПР)……. 74

4.1 Узагальнена класифікація САПР……. 74
4.2 Комплекс технічних засобів САПР для реалізації автоматизації проектування…… 78
4.3 Особливості методичного, програмного та інформаційного забезпечень сучасних САПР…….. 85
4.4 Режими взаємодії конструктора з обчислювальною системою при автоматизації проектування……... 94
Список літератури…….. 98

ВСТУП

Особлива роль у підвищенні економічної ефективності роботи залізничного транспорту відводиться оперативному створенню і вмілому використанню нових інформаційно-керуючих систем і транспортних технічних засобів з високими техніко-економічними показниками функціонування у широкому спектрі умов експлуатації. При цьому збільшується попит на висококваліфікованих фахівців з економіки транспорту, управління процесами перевезень, рухомого складу залізниць, спеціальної техніки, колійного господарства, теплоенергетики та ін.

Зростають вимоги і до рівня вищої інженерної освіти, яка повинна забезпечувати не тільки достатню загальноінженерну та спеціальну підготовку, а ще й ґрунтовну методологічну підготовку в галузі техніки і технічних наук, створення та експлуатації складних технічних систем, конструювання сучасних технічних засобів.

У плані такої підготовки під час навчання студенти повинні отримати знання та уявлення про загальні проблеми і шляхи створення нової техніки, сучасну методологію проектування технічних засобів і методи оптимізаційного конструювання, можливості й особливості використання в інженерній діяльності систем автоматизованого проектування.

На таку підготовку спрямовані програмні модулі дисципліни «Основи автоматизації проектування», яку вивчають майбутні спеціалісти з експлуатації різних технічних систем транспорту.

У цьому конспекті лекцій викладено матеріали щодо основних елементів сучасної методології автоматизованого проектування, а також його підходів, стратегій та методів; автоматизації оптимізаційного проектування технічних засобів; особливостей використання автоматизації проектування в сучасних системах автоматизованого проектування.

1 АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЕКТУВАННЯ – ОСНОВНИЙ ЕЛЕМЕНТ СУЧАСНОЇ МЕТОДОЛОГІЇ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ

1.1 Роль автоматизації проектування у створенні систем автоматизованого проектування нових технічних засобів

Розвиток сучасного суспільства характеризується безупинним ростом різноманітних потреб, що зумовлює необхідність створення нових складних технічних засобів (*ТЗ*). На рисунку 1.1 наведена абстрактна схема створення нових ТЗ (*укрупнена модель їх життєвого циклу*), яка об'єднує ряд операційних елементів і відбиває процес задоволення суспільної потреби у визначеному ТЗ.

Видно, що **вхідним операційним елементом** процесу, що розглядається, є виділення і точне визначення (*ідентифікація*) потреби в даному ТЗ. Першим операційним елементом є **проектування**, яке визначає спосіб задоволення потреби, основи функціонування і загальне улаштування ТЗ (*вид і параметри робочих процесів, структурна і кінематична схема, компонування ТЗ та ін.*).

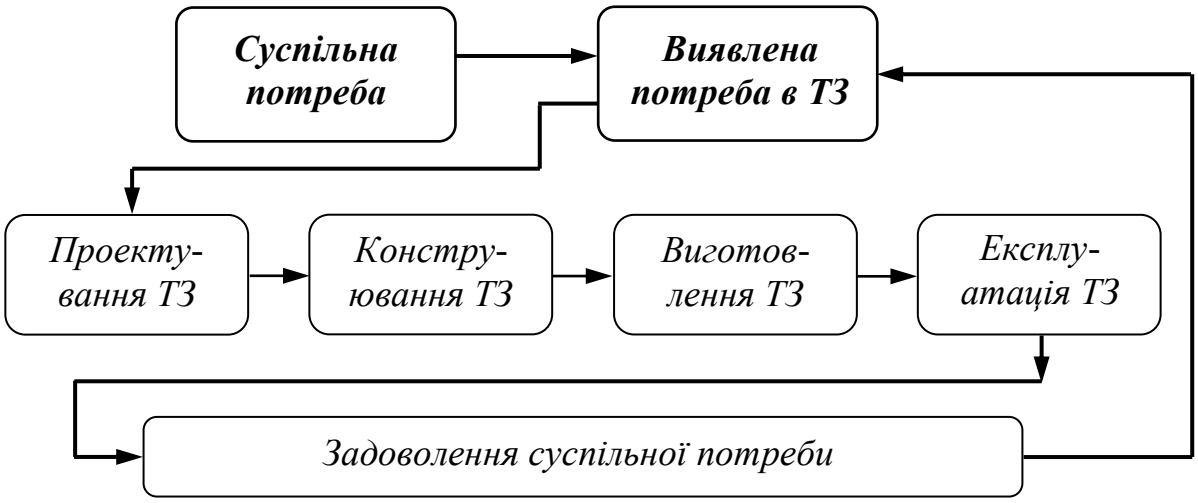


Рисунок 1.1 – Абстрактна схема створення ТЗ

Другим операційним елементом є **конструювання**, яке передбачає подальшу розробку (*у рамках визначеної при проектуванні загальної будови*) однозначного варіанта

конструкції машини, який відповідає всім висунутим вимогам. Результати проектування і конструювання становлять основу проекту ТЗ – **комплекту конструкторської документації**, що дає змогу виготовити ТЗ на певному підприємстві. Третім операційним елементом є **виготовлення** ТЗ на підприємстві (*у повній відповідності з проектом за робочими кресленнями деталей*). Четвертим операційним елементом життєвого циклу є **експлуатація** нового ТЗ. Він і є завершальним у процесі задоволення суспільних потреб.

Одним із найважливіших напрямків росту і подальшого посилення економіки України є нарощування темпів розвитку виробництва нової техніки, яка б забезпечувала значне підвищення продуктивності праці. Під **новою технікою** розуміють такий технічний засіб, у якому показник сумарних витрат на його розробку, виробництво та експлуатацію, віднесений до обсягу корисно виконаної роботи за термін служби значно нижчий (*у 5-10 разів*) порівняно з випущеним раніше.

З урахуванням сучасних вимог до забезпечення високого рівня техніко-економічних показників (*ТЕП*) нової техніки особливо актуальними є проблеми скорочення часу і зменшення витрат на отримання проектів (*проектування і конструювання*) і виготовлення ТЗ. Це визначає необхідність розробки і широкого використання відповідних систем автоматизованого проектування (*САПР*) та автоматизованих систем підготовки виробництва ТЗ, що дасть змогу більш як у 1,5 – 2 рази скоротити терміни і проектно-виробничі витрати на створення нових ТЗ.

Як свідчить досвід, найбільша економічна ефективність нової техніки може досягатися при використанні інтегрально-автоматизованих систем для створення необхідних ТЗ (*рисунок 1.2*). Вони передбачають наявність і взаємопозв’язане функціонування відповідних автоматизованих систем планування (*АСП*), автоматизованих систем наукових досліджень (*АСНД*), САПР, автоматизованих систем управління виробництвом (*АСУВ*), технологічною підготовкою виробництва (*АСУТПВ*), гнучких виробничих систем (*ГВС*), а також автоматизованих систем збору статистичної інформації (*АСЗСІ*) з полігонів експлуатації ТЗ.

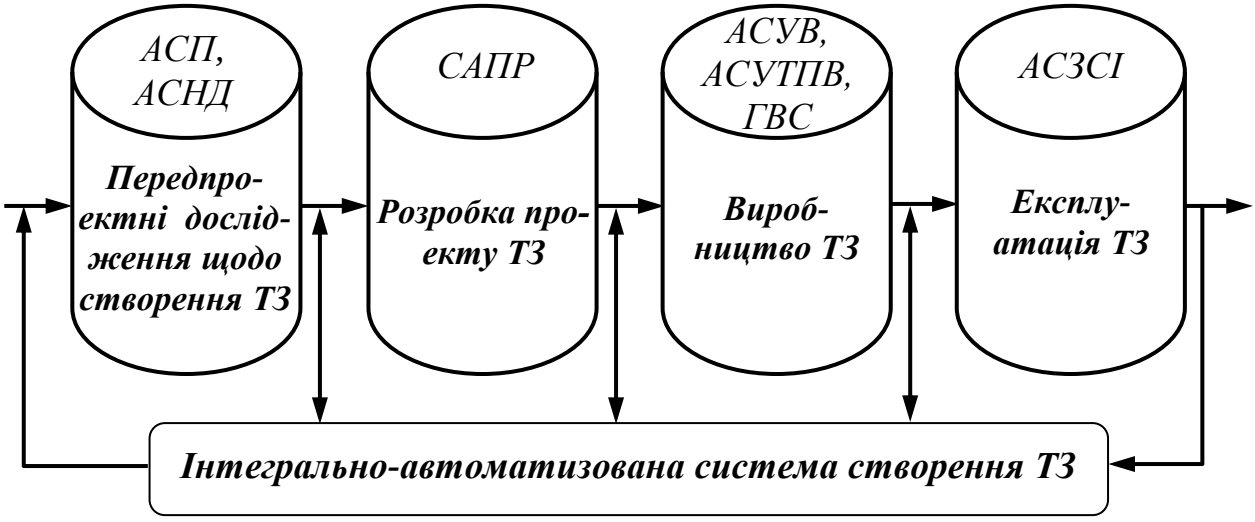


Рисунок 1.2 – Узагальнена схема інтегрально-автоматизованої системи створення нових ТЗ

Як показує світовий досвід, систематичне зниження кількості застарілих ТЗ, що експлуатуються, та насичення галузей новими ТЗ є характерною ознакою науково-технічного прогресу країни, зростання її наукового і виробничого потенціалу, посилення економіки. При цьому у вирішенні вказаної задачі особливу роль відіграє правильний вибір **шляхів створення нової техніки**, які у загальній постанові розглянуті нижче.

Одним з них є шлях, орієнтований на **самостійну розробку і виробництво** практично всіх видів необхідної для народного господарства нової техніки. Однак світовий досвід показує, що яку б розвинуту економіку або машинобудування не мала окрема країна, вона не в змозі без обміну технологіями, агрегатами, досвідом з іншими країнами забезпечувати ТЗ на рівні світових зразків усі галузі.

За певних умов досить ефективним може виявитися **ліцензійний шлях** – придбання ліцензій з комплектом необхідної конструкторсько-технологічної документації на виробництво сучасних ТЗ. Водночас використання такого шляху не повною мірою забезпечує оперативне задоволення потреб у даному ТЗ. Ліцензія не може одразу замінити необхідний ТЗ – для його виробництва і введення в експлуатацію буде потрібний значний період часу. До того ж захоплення ліцензійним шляхом може призвести до стійкого технічного відставання відповідних

галузей. На момент свого виготовлення ТЗ може виявитися вже застарілим.

Найбільш ефективним шляхом задоволення потреб країни в нових ТЗ є шлях, оснований на **міжнародному розподілі праці**. Він передбачає розвиток власного виробництва ТЗ за тими галузями, за якими можна зайняти головні позиції й успішно конкурувати на світовому ринку, із подальшим постачанням цих ТЗ в інші країни й одержанням від них (*в обмін або закупівлею*) необхідних для народного господарства ТЗ, які не виготовляються у країні.

Поряд з вибором найбільш ефективних шляхів задоволення суспільних потреб у новій техніці, її створення пов'язане з необхідністю вирішення ряду науково-технічних проблем.

Однією з основних є **проблема досягнення високого технічного рівня ТЗ**, який характеризує його технічну цінність і корисність відповідно до призначення.

Технічний рівень об’єкта являє собою кількісну характеристику ступеня його технічної досконалості, що виражається в різних технічних та інформаційних одиницях вимірювання (*рівнях основних параметрів, експлуатаційних характеристиках, екологічних показниках*). Виражений у відносних одиницях (*до одиниць часу, шляху, потужності, об'єму та ін.*), він дає змогу порівнювати зразки нової техніки з іншою, що має високий світовий технічний рівень, та оцінювати її переваги або ж недоліки.

Слід зазначити, що високий технічний рівень ТЗ насамперед забезпечується високим технічним рівнем їх проектів, закладеними при проектуванні параметрами робочих процесів і прогресивними особливостями конструкції, які визначаються на основі проведених науково-дослідних робіт (*НДР*), виявлених тенденцій розвитку ТЗ і світового досвіду. Також варто враховувати, що на технічний рівень ТЗ, що випускаються, істотний вплив має технічний рівень підприємства-виготовлювача. Показниками технічного рівня підприємства служать науково-технічний (*науково-інформаційне забезпечення, власні розробки, патенти, висококваліфіковані кадри*) і виробничий (*технічна озброєність, матеріально-технічне забезпечення, рівень організації виробництва*) потенціали.

До найважливішої належить і **проблема забезпечення високої якості ТЗ,** під чим розуміють сукупність властивостей, що визначають придатність ТЗ за всіма встановленими вимогами для застосування за призначенням. У свою чергу оцінка якості ТЗ поєднує **технічну оцінку** (*оцінки технічного рівня, експлуатаційних характеристик, надійності, особливостей технічного обслуговування та ін.*), **товарознавчу оцінку** (*оцінка корисності виробу, задоволення вимог збуту*) та **економічну оцінку** якості (*специфічні особливості виробництва, якою ціною досягнута висока якість*).

Особливе місце при створенні ТЗ займає **проблема забезпечення і захисту новизни запропонованих технічних рішень**. Це пов'язано з тим, що розробка проекту ТЗ базується на багатьох технічних рішеннях, які утворюють структуру його механізмів, вузлів, деталей або елементів їх конструкції. При цьому більшість з них є загальновідомими – описаними у відповідних стандартних типових проектах, атласах, альбомах уже наявних ТЗ і можуть бути використані при проектуванні. Поряд з ними у створюваному ТЗ використовуються і нові технічні рішення (винаходи), в одержанні і захисті новизни яких важливе значення має патентна інформація, яка міститься в патентах. **Патент** (*діючий з 1992 р.*) – охоронний документ новизни виробу, який містить сукупність відомостей про результати науково-технічної діяльності та підтверджує виключне право автора (*авторів*) на використання винаходу терміном 20 років з дня подачі заявки на винахід.

Основною частиною патенту є **опис винаходу**. У ньому в стислій формі наводяться дані про структуру й особливості запропонованого технічного рішення, сутність якого викладена у **формулі винаходу** – короткому словесному викладі ознак винаходу. При цьому важливою (*з погляду розуміння фахівцями різних галузей, різних країн*) особливістю патентної документації є однаковість викладення матеріалів на основі використання спеціальних стандартних мовних конструкцій і загальноприйнятої наукової термінології. Усі основні стадії розробки проекту нового ТЗ передбачають підготовку **патентного формуляра** (*звіту*), що забезпечує і захищає новизну, а також патентну чистоту запропонованих технічних рішень.

1.2 Забезпечення найважливіших техніко-економічних показників при автоматизації проектування

До найважливіших техніко-економічних показників, забезпечення яких контролюється при розробці проектів нових ТЗ, належать їх **працездатність** та **надійність**, а також **технологічність**, **економічність**, **екологічність** в експлуатації та **естетичність**.

Під працездатністю розуміють такий стан ТЗ, при якому він здатний виконувати задані функції (*функціонувати*), зберігаючи значення основних параметрів у межах, установлених відповідними нормативними документами.

Основними критеріями працездатності ТЗ і його деталей є: ***міцність, жорсткість, стійкість, вібростійкість, зносостійкість, теплостійкість.***

З перерахованих критеріїв головним є **міцність** – спроможність деталей, елементів конструкції ТЗ не руйнуватися при діючих навантаженнях. У багатьох випадках порушення вимог працездатності при експлуатації ТЗ обумовлюється надмірними пружними деформаціями сполучених деталей унаслідок їхньої недостатньої **жорсткості**, під якою розуміють спроможність деталей чинити опір деформаціям (*зміні форми і розмірів*) під дією навантажень. Найважливішою вимогою збереження працездатності відповідальних деталей ТЗ є забезпечення в процесі експлуатації їхньої **стійкості** – спроможності зберігати початкову (*прямолінійну*) форму рівноваги.

Збільшення швидкостей руху транспортних ТЗ, їхніх деталей при відповідному до цієї тенденції зниженні маси конструкції, як правило, приводить до підвищення рівня **віброактивності** (*прояву механічних коливань у рухомих системах*) сучасних ТЗ. Відзначене свідчить про істотну роль у забезпеченні працездатності **вібростійкості** ТЗ – здатності працювати на експлуатаційних режимах без неприпустимих рівнів вібрацій. Важливість цього критерію визначається і тим, що поряд із шкідливими технічними проявами (*порушення заданих законів руху деталей, додаткові інерційні навантаження та ін.*), вібрації становлять небезпеку і для людини (*притуплення*

зору, слуху, анемія кінцівок, порушення біохімічного складу крові внаслідок руйнування кровотворної системи).

Виконання вимог працездатності ТЗ нерозривно пов'язане із забезпеченням **зносостійкості** – опору його деталей, а також усіх елементів конструкції, що контактують рухомо, зношуванню (*руйнуванню поверхневих шарів при терті, поступовій зміні розмірів, форми, маси і стану поверхонь, що контактують*). Результатом (*кількісною оцінкою*) процесу зношування є **знос**, який знижує міцність деталей, змінює характер їх сполучення, збільшує зазори в рухомих з'єднаннях, викликає шум.

Працездатність багатьох ТЗ значною мірою залежить від ступеня задоволення критерію **теплостійкості** – здатності деталей зберігати працездатність у заданих межах зміни температурного режиму, обумовленого робочим процесом і проявом тертя в його механізмах і вузлах. Це пов'язано з тим, що надмірне нагрівання деталей може викликати: зниження міцності матеріалу, появу додаткових деформацій і напруг, порушення нормальних умов змазування (*підвищений знос*), зміну зазорів у сполучених деталях.

Слід зауважити, що розрахунки, спрямовані на забезпечення і контроль працездатності ТЗ, виконуються з наростаючою точністю на всіх основних етапах проектування. Їх поділяють на **проектувальні** (*попередні*) та **перевірочні** розрахунки. Метою **проектувальних розрахунків** є визначення основних розмірів деталі (*наприклад, діаметра вала, що сполучається із зубчатим колесом*), що задовольняють найбільш важливі критерії працездатності. Метою **перевірочних розрахунків** є визначення запасів міцності в небезпечних перерізах деталі.

Найважливішою критеріальною вимогою до нового ТЗ є його **надійність** – властивість ТЗ виконувати задані функції (*зберігати працездатність*) протягом необхідного часу (*або необхідного наробітку – мотогодин для двигуна, кілометражу пробігу для автомобіля та ін.*).

Основними критеріями надійності ТЗ є: ***безвідмовність, довговічність, ремонтопридатність та збережність.***

Для непризначених до тривалого збереження ТЗ надійність визначається **безвідмовністю** – збереженням працездатності протягом заданого часу. Для багатьох ТЗ найважливіша роль

приділяється їх **довговічності** – збереженню працездатності до граничного стану (*при якій подальша експлуатація або неможлива, або недоцільна*) при відповідних системах технічного обслуговування і ремонту. Однією з головних експлуатаційних вимог є **ремонтопридатність** – пристосованість ТЗ до відновлення працездатності на основі запобігання відмовам, виявлення й усунення несправностей при технічному обслуговуванні і ремонті. Характерною вимогою до ТЗ тривалого збереження є **збереженість** – забезпечення працездатності протягом і після встановлених термінів збереження і транспортування.

При розв'язанні техніко-економічних задач як показник для оцінки надійності функціонування ТЗ широко застосовується **імовірність безвідмовної роботи** $P(t)$ – імовірність того, що в заданому інтервалі часу (*у межах заданого наробітку*) не виникне відмови ТЗ. Для технічних засобів указаний показник можна розрахувати за такою формулою:

$$P(t) = 1 - \frac{N(t)}{N},$$

де $N(t)$ – кількість ТЗ, що підлягали випробуванням протягом заданого інтервалу часу t і в яких було зафіксовано відмови;

N – загальна кількість однакових ТЗ, які надійшли на випробування.

Для оцінки надійності технічних систем визначення їх імовірності безвідмовної роботи відбувається залежно від характеру взаємних зв'язків технічних засобів, які входять до їх складу.

Отже, якщо система складається з n послідовно з'єднаних елементів з імовірностями безвідмовної роботи $P_1(t)$, $P_2(t)$, …. , $P_n(t)$ (*відмови в ній незалежні і кожна призводить до відмови всієї системи*), то ймовірність безвідмовної роботи такої системи $P_{\Sigma посл}$ визначається за формулою

$$P_{\Sigma посл} = P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot \ldots \cdot P_n(t) = \prod_{i=1}^{n} P_i(t).$$

З наведеної формули видно, що ймовірність $P_{\Sigma посл}$ буде зменшуватися зі збільшенням кількості елементів системи, а також буде завжди нижче відповідного значення $P_i(t)_{min}$.

При паралельному з'єднанні *n* елементів (*на відміну від попереднього варіанта*) повна відмова системи настає за відмови всіх елементів. При цьому загальна ймовірність $P_{\Sigma пар}$ визначається за формулою

$$P_{\Sigma пар} = 1 - \prod_{i=1}^{n} [1 - P_i(t)].$$

У цьому випадку $P_{\Sigma пар}$ буде вища $P_i(t)_{min}$ і ймовірність безвідмовної роботи системи з паралельним з'єднанням елементів буде вища порівняно із системою, яка передбачає послідовне з'єднання складових.

Одним з комплексних показників ТЗ, який забезпечує задані експлуатаційні якості деталей та збірних одиниць і характеризує мінімальні витрати засобів, часу та праці при їх виготовленні, експлуатації та ремонті, є **технологічність**. До основних напрямків забезпечення технологічності можна віднести: окреслювання при конструюванні форм деталей простими поверхнями (*циліндричними, конічними та ін.*), найбільш зручними для обробки механічними та фізичними методами; використання для виготовлення деталей конструкційних матеріалів, які забезпечують використання маловідходних та ресурсозбережних технологій обробки (*тиском, зварюванням, точним литтям, лазером та ін.*); раціональне використання єдиної системи допусків та посадок (*обґрунтоване завдання технічних умов на виготовлення деталей*).

Найважливішим показником ТЗ, який характеризується досягненням його **високої економічної ефективності** (*яка формується при проектуванні, виробництві та експлуатації*), є **економічність**. У той же час проектування нового ТЗ повинно бути **економічно спрямованим** – ураховувати увесь комплекс

чинників, які визначають економічну ефективність ТЗ, правильно оцінювати їх питому вагу. Таке проектування базується на **техніко-економічному аналізі**, який передбачає порівняння різних варіантів проектно-конструкційних рішень не тільки із суто технічного, а й з економічного боку. Отже, для техніко-економічного аналізу необхідно проводити техніко-економічні розрахунки (*ТЕР*), у яких, крім технічних, беруть участь і економічні категорії (*такі як витрати матеріалів, енергії, праці та інших ресурсів*).

Наприклад, згідно з таким підходом, при конструюванні ТЗ тільки з урахуванням критерію міцності можливі такі варіанти його конструкції: варіант, який характеризується конструюванням усіх деталей з найбільшими коефіцієнтами запасу міцності з метою створення ТЗ з невеликими експлуатаційними витратами (*у результаті конструкція ТЗ характеризується збільшеними витратами у виробництві, значними габаритами і вагою*); варіант, який характеризується конструюванням усіх деталей з найменшими коефіцієнтами запасу міцності у розрахунку на те, що в експлуатації не буде порушень заданих початкових умов (*при такому варіанті конструкції ТЗ зменшуються витрати у виробництві, його габарити, вага, але збільшуються експлуатаційні витрати, що визначається необхідністю підтримки працездатності, надійності ТЗ в реальних умовах експлуатації*); варіант конструкції ТЗ, близький до другого варіанта, але доповнений автоматизованою системою захисту ТЗ на випадок порушень умов експлуатації (*при цьому забезпечується низький рівень витрат як у виробництві, так і в експлуатації ТЗ. З позиції економічно спрямованого проектування він є* ***варіантом з більш високою економічною ефективністю***).

На **початкових стадіях проектування**, коли розглядається велика кількість можливих варіантів конструкції ТЗ, доцільність створення того чи іншого варіанта конструкції ТЗ визначається меншими **приведеними витратами** $З$, які розраховують за формулою

$$З = З_е + E_н \cdot З_в,$$

де $З_в, З_е$ – відповідно витрати на виготовлення та експлуатацію ТЗ;

$E_н = 0{,}15$ – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень.

Основним кількісним показником економічної ефективності, який розглядається на **кінцевих стадіях проектування**, є **річний економічний ефект** $E_р$ від виробництва та експлуатації нового ТЗ тривалого застосування з поліпшеними якісними характеристиками.

Узагальнена формула для його визначення має вигляд

$$E_р = (E_в + E_е) \cdot A_в,$$

де $E_в$, $E_е$ – відповідно економії, які отримують при виробництві та експлуатації нового ТЗ порівняно з тим, на заміну якого він призначений;

$A_в$ – річний обсяг виробництва нового ТЗ.

Крім того, при вирішенні питання заміни існуючого ТЗ на новий необхідно враховувати також **аспект морального старіння техніки**. Якщо підвищуються показники надійності, якості продукції, продуктивності і знижуються витрати на експлуатацію нового ТЗ, то базовий ТЗ такого класу стає морально застарілим (*навіть якщо він фізично новий*).

До основних показників, які впливають на формування величини $E_р$, при конструюванні нового ТЗ належать: **собівартість, трудомісткість та матеріаломісткість**. **Собівартість** являє собою еквівалентні грошові витрати виробника на виробництво одиниці продукції, т**рудомісткість** – нормовану суму витрат праці (*в одиницях часу*) на виготовлення деталей, складальних одиниць і ТЗ в цілому, а **матеріаломісткість** являє собою показник витрат матеріальних ресурсів на виробництво ТЗ.

Під **екологічністю** ТЗ розуміють рівень відсутності шкідливих проявів з його боку до зовнішнього середовища, природи та людини. У той же час **естетичність** ТЗ представляє

рівень досконалості та привабливості форм, зовнішнього вигляду деталей, збірних одиниць та ТЗ в цілому.

1.3 Особливості використання автоматизації проектування на різних стадіях розробки проектів нових технічних засобів

Головною метою проектування і конструювання є розробка **проекту ТЗ** – повного комплекту конструкторської документації, який вміщує необхідні відомості для виготовлення ТЗ в заданих умовах виробництва.

Як процес, що розвивається в часі, проектування підрозділяється на відповідні **стадії** (*опис наводиться нижче*)**, етапи, проектні процедури та операції**.

Під **етапом проектування** розуміють частину процесу проектування, яка стосується одного чи декількох ієрархічних рівнів проектування ТЗ (*у межах певної стадії проектування*) і закінчується отриманням відповідного проектного рішення. Частини етапів проектування розглядаються як **проектні процедури** (*наприклад, конструювання деталі*), а ще дрібніші – як **проектні операції** (*наприклад, отримання робочого креслення цієї деталі*).

Проектування нових ТЗ базується на результатах відповідних **передпроектних досліджень**, які проводяться з метою розробки **технічного завдання** (ТЗП) на створення нового ТЗ – основного документа для його проектування. У ньому повинні бути відбиті дві групи показників, що висвітлюють: потреби суспільства в новому ТЗ, а також характеристики технічного та економічного рівня.

При розробці ТЗП особлива роль приділяється методам **наукового прогнозування** і **планування** робіт із створення нового ТЗ.

Наукове прогнозування, як дослідницький процес, дає змогу встановити головні напрямки розвитку створюваного ТЗ, одержати ймовірні дані про його майбутній стан (*потреби в ньому, відповідність показників технічного рівня*).

Найбільш поширеними є дві групи методів наукового прогнозування:

- **евристичні методи** ґрунтуються на прогнозах (*передбаченнях*) фахівців-експертів у відповідних прогнозованому об'єкту галузях (*суб'єктивних експертних оцінках*);

- **математичні методи** є більш точними. Вони основані на математичному описі і дослідженні (*з наступною екстраполяцією*) прогнозних тенденцій розвитку розглянутих ТЗ.

Прогнозна тенденція виявляється шляхом отримання і вивчення відповідної інформації про об’єкт прогнозування. На основі ретроспективної інформації визначають дані (*опорні точки*) для побудови графіків розвитку прогнозних тенденцій, які отримали назву **трендів**. Як приклад на рисунку 1.3 наведено тренд для оцінки рівня форсування транспортних чотиритактних двигунів внутрішнього згоряння за середнім ефективним тиском.

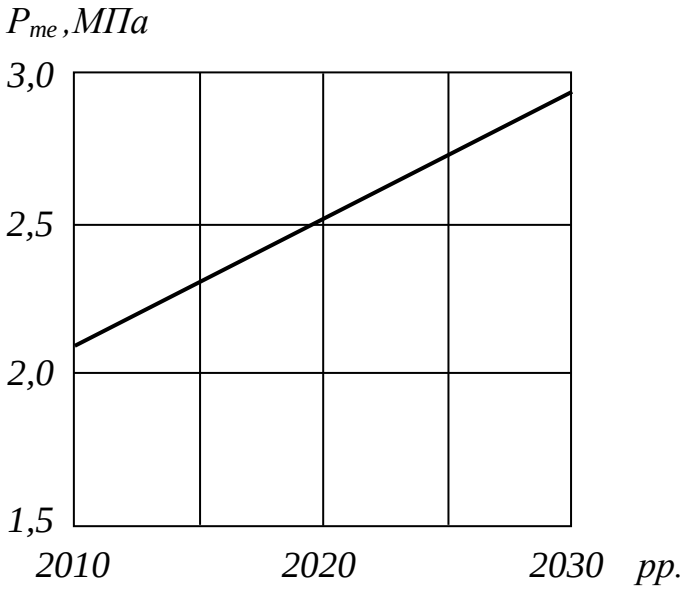


Рисунок 1.3

Науковим плануванням охоплюється не тільки розробка нових ТЗ, але й подальша модернізація і поліпшення якості ТЗ, що вже випускається. Залежно від охопленого періоду часу розрізняють короткострокові плани (*річні – планують виконання окремих науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт*), середньострокові (*п'ятирічні – розробка науково-технічних проблем, наукових тем*) і довгострокові плани (*десятирічні і більше – розробка актуальних для народного господарства України*).

До **стадій проектування** складних ТЗ відносять: розробку технічної пропозиції; розробку ескізного проекту; розробку технічного проекту; розробку робочого проекту; створення, випробування і доведення дослідного зразка; передачу ТЗ в основне виробництво (*відповідно серійне або масове*).

Розробка **технічної пропозиції** (*ТП*) є початковою стадією проектування, яка виконується в тому випадку, якщо це передбачено технічним завданням. Вона містить опис запропонованого варіанта ТЗ (*ретельно обґрунтованого в теоретичному і практичному плані*).

Відповідно до державних стандартів ТП повинна мати основні схеми, спрощені габаритні креслення, креслення загальних видів ТЗ, а також відомість ТП (*документів, що входять до неї*) і пояснювальну записку, яка містить необхідні таблиці, розрахунки, патентний формуляр, карту технічного рівня і показники якості. Спільний розгляд ТП розроблювачем і замовником оформляється відповідним протоколом.

Ескізний проект (*ЕП*) розробляється в тому випадку, якщо це передбачено ТЗП або протоколом розгляду ТП. Основою технічного проекту є пояснювальна записка, яка містить опис принципу роботи ТЗ, відповідні техніко-економічні показники, пропозиції з подальших конструкторських та експериментальних робіт, а також вимоги до проведення окремих етапів технічного проектування.

Розробка **технічного проекту** здійснюється, якщо це передбачено технічним завданням, протоколами розгляду ТП і ЕП відповідно до чинних державних стандартів. Його зміст становлять технічні рішення і дані, що визначають повне уявлення про будову і принципи роботи ТЗ, рішення проблеми забезпечення його високого технічного рівня (*включно з процесом експлуатації*), забезпечення працездатності, надійності, технологічності та ін. Основою технічного проекту є креслення загальних видів ТЗ та складальні креслення основних його вузлів.

Метою розробки **робочого проекту** (*РП*) є підготовка повного комплекту робочої конструкторської документації, яка забезпечує виготовлення ТЗ у певних обсягах на конкретному підприємстві-виробникові.

Стадія створення, випробування і доведення конструкції дослідного зразка ТЗ забезпечує можливість коректування і виправлення конструкторської документації, тому що в процесі свого виготовлення деталі вперше набувають просторову форму і розміри відповідно до плоских проекцій робочих креслень

(*виправляються помилки, викликані неуважністю і недоліками просторової уяви конструктора*).

1.4 Загальні підходи до виявлення помилок і контролю конструкторської документації

За статистичними даними, від *60* до *90 %* несправностей ТЗ, що експлуатуються, пов'язані з помилками, які допускаються при їх проектуванні та виготовленні. У зв'язку з цим виникає потреба в контролі конструкторської документації (*КД*), який полягає у виявленні помилок та своєчасному їх виправленні.

У загальному уявленні розрізняють такі групи помилок у КД:

- **проектно-конструкторські помилки.** Як правило, це приховані помилки, що полягають у виборі неправильного загального напрямку розробки ТЗ, недосконалих робочих процесів, схем та ін. До 30 % таких помилок визначаються недостатнім рівнем науково-технічних передпроектних досліджень, до 11 % – використанням оригінальних деталей і вузлів при наявності відповідних стандартних;

- **помилки в розрахунках.** Характеризуються неправильними розрахунковими оцінками при проектуванні і конструюванні показників працездатності, надійності, економічної ефективності ТЗ (*головним чином, через використання наближених методик розрахунків*). Більше 12 % таких помилок пов'язано з відсутністю перевірочних розрахунків на міцність оригінальних елементів конструкції ТЗ;

- **помилки в розмірах.** Проявляються у невідповідності зазначених на робочому кресленні деталі (*чи вузла*) розмірів умовам їх нормальної роботи у складі ТЗ.

Прикладом таких помилок є показаний на рисунку 1.4 фрагмент креслення елемента конструкції ТЗ на основі рейкової передачі. Видно, що при обертанні зубчатого колеса *1* потрібне переміщення рейки *2* (*визначається розміром L*) не може бути отримано внаслідок конструктивних обмежень її руху (до упору) у напрямних *3* ($L_H < L$). Для забезпечення нормальної роботи пристрою необхідна зміна конструкції напрямної *3* (*показано пунктиром*).

З метою усунення помилок конструювання і забезпечення високої якості проекту ще до виготовлення дослідного зразка ТЗ здійснюються нижченаведені **види контролю КД,** обумовлені відповідними державними стандартами.

Конструкторський контроль – охоплює всі конструкторські документи (*розрахунки, креслення*), виконується головним конструктором або начальником підрозділу. При цьому використовується **аналітичний** (*перерахування розмірних ланцюгів з урахуванням припустимих відхилень*) і **графічний** (*«контрольне складання» ТЗ за робочими кресленнями*) **методи.** За статистичними даними, на частку конструкторських помилок припадає до 50 % помилок, що наявні у проекті ТЗ. До речі, 15 % помилок визначаються неуважністю, відвертанням уваги виконавців окремих робіт.

Технологічний контроль – контроль за всебічним дотриманням у КД технологічних норм і вимог. На цій основі ще при конструюванні ТЗ можна забезпечити зниження трудомісткості його виготовлення і складання на 10-20 %. На частку помилок, які виявляються при технологічному контролі КД, припадає до 15 % (*від загальної кількості помилок у проекті*).

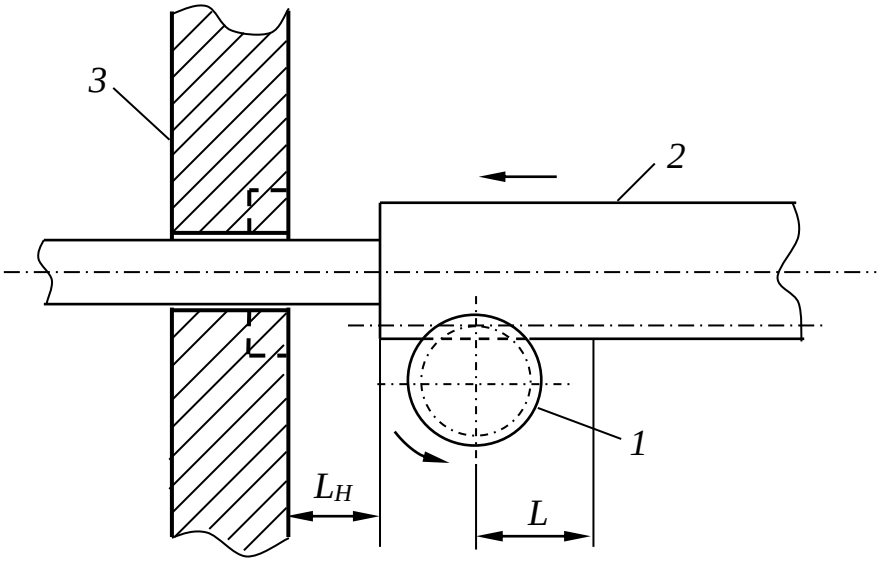


Рисунок 1.4 – До розглядання помилок у розміру в КД

Як приклад на рисунку 1.5 наведені варіанти конструкторських рішень, які не відповідають (***а, в***) і відповідають (***б, г***) технологічним вимогам.

Нормалізаційний контроль (нормоконтроль) охоплює питання дотримання стандартів, виконання вимог до розробки й оформлення КД, вимог стандартизації та уніфікації технічних

рішень (*наприклад, вилучення із конструкції оригінальних деталей при наявних типових, стандартних*).

Метрологічний контроль – контроль правильності вибору лімітуючих параметрів ТЗ (*припустимих відхилень розмірів згідно з єдиною системою допусків і посадок, точності вимірів, округлення розмірів, різних технічних умов і вимог*). Наприклад, вимога «розчин готують змішанням компонентів *x* і *y* у співвідношенні *1:5*» – не відповідає метрологічним вимогам, тому що не містить інформації, про яке саме співвідношення іде мова (*масове або об'ємне*).

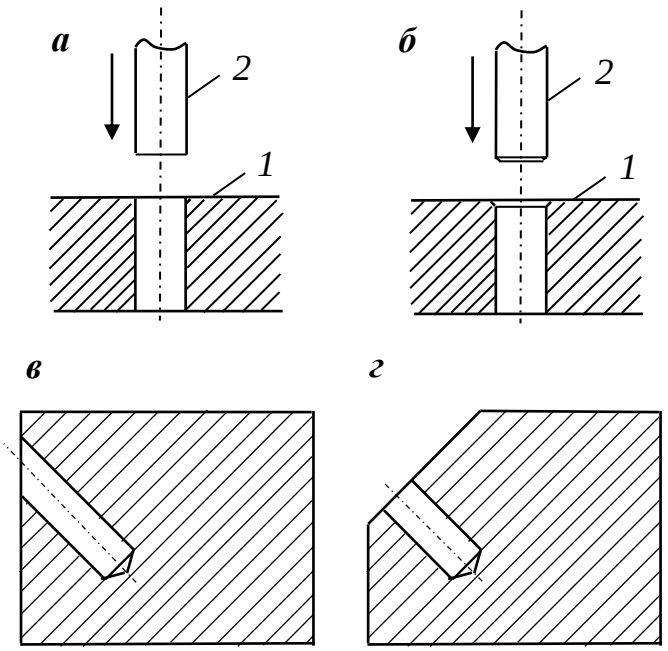


Рисунок 1.5 – До проведення технологічного контролю КД

Слід відмітити, що на частку нормалізаційного і метрологічного контролю припадає більш ніж 12 % помилок, які виявляються при контролі КД для виготовлення нових ТЗ.

З метою контролю і забезпечення виконання всіх вимог проекту, усунення можливих помилок і недоліків, а також внесення визначених особливостями виробництва змін, на стадії виготовлення і доведення дослідного зразка ТЗ на відповідному підприємстві здійснюється обумовлений держстандартами **«Авторський нагляд»**, у ході якого всі виявлені зміни заносяться відповідальним конструктором у **«Екземпляр конструктора»** (копію повного комплекту КД).

Надалі згідно із зауваженнями і змінами, що містяться в **«Екземплярі конструктора»**, проводиться коректування всієї (усіх комплектів) конструкторської і технологічної документації на створення ТЗ. При цьому на всі зміни, що вносяться, випускається відповідно до вимог стандартів **«Сповіщення про**

зміни», які належать до однієї з п’яти груп (та встановлених у межах кожної групи підгруп).

Розподілення сповіщень за групами відповідає причинам їх виникнення – конструкторські, технологічні недоробки, недоліки технологічної, організаційної підготовки виробництва, креслярсько-графічні неточності.

Виправлені комплекти КД передаються на виробництво і використовуються для виготовлення ТЗ в обговорених ТЗП обсягах.

2 ПІДХОДИ, СТРАТЕГІЇ ТА МЕТОДИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ

2.1 Елементи сучасної методології автоматизації проектування

В узагальненому уявленні **сучасна методологія проектування** об'єднує обрану (*розроблену*) для одержання проекту технічного засобу раціональну послідовність дій (*стратегію проектування*) і нові підходи, принципи, методи і методики, які забезпечують її практичне виконання. Прагнення до найбільш повного задоволення розглянутих раніше вимог обумовлює необхідність проведення проектування ТЗ на основі **системного підходу** (***системного проектування***), який базується на виявленні та обліку при проектуванні найважливіших особливостей тієї галузі, у якій буде функціонувати технічний засіб, що створюється. Його реалізація при проектуванні нових ТЗ передбачає взаємопов'язаний розгляд, облік і відображення в проектно-конструкторських рішеннях ряду теоретичних аспектів, основними з яких є: ***системно-функціональний*** (*СФА*), ***системно-компонувальний*** (*СКА*), ***системно-структурний*** (*ССА*) і ***системно-інтегративний*** (*СІА*). В узагальненому уявленні *системно-функціональний аспект* (*системно-проектувальний*) передбачає виділення та відображення при проектуванні основних принципів функціонування ТЗ, характеру фізичних, хімічних та інформаційних процесів, які в ньому відбуваються. *Системно-компонувальний аспект* полягає в

розробці компонувальної схеми з використанням певних елементів (*вузлів та комплексів*). *Системно-структурний аспект* полягає у виділенні особливостей структури компонувальних елементів ТЗ та зв'язків між ними (*з метою отримання максимально наближених до реальних кінематичних та динамічних характеристик*). *Системно-інтегративний аспект* передбачає облік та оцінку впливу особливостей конструкції ТЗ, робочих та динамічних процесів, що відбуваються в їх окремих елементах, на вихідні техніко-економічні показники.

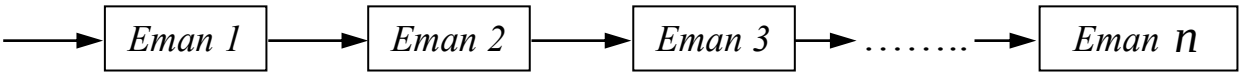
Слід зазначити, що при системному проектуванні особлива роль приділяється й обліку вимог екології. Це пов'язано з тим, що більшість об'єктів техносфери поряд із задоволенням суспільних потреб (*за своїм призначенням*) негативно впливає на людину. Відомими і дуже актуальними є загальносвітові проблеми негативних змін у біосфері (*як наслідок забруднення атмосфери, рік, морів промисловими підприємствами, теплоенергетичними установками та ін.*). Тому при створенні сучасних ТЗ усе частіше вимоги екології є пріоритетними.

Одну з головних ролей у сучасній методології автоматизованого проектування відіграють **стратегії**, які обираються або формуються для вирішення відповідних проектно-конструкторських задач. Формування **загальної стратегії проектування** ТЗ передбачає розбивання задачі проектування на окремі етапи (*відповідно до формалізованого опису об'єкта*) і розробку укрупненого плану (*послідовності дій*) проведення проектно-конструкторських робіт на етапних і міжетапних рівнях.

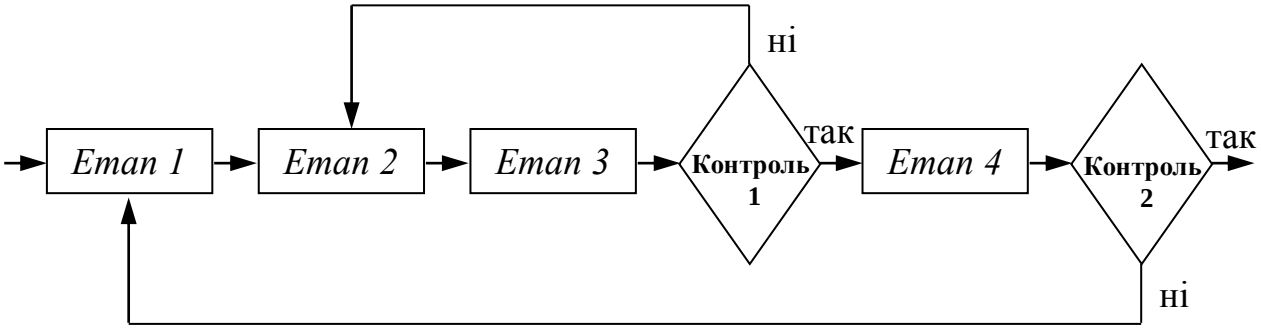
Аналіз шляхів вирішення розглядуваної задачі в САПР різних ТЗ вказує на те, що розробка загальної стратегії автоматизованого проектування в більшості випадків базується на окремих варіантах існуючих стратегій конструювання, які поділяються на **лінійні**, **циклічні** та **розгалужені**.

Лінійні стратегії (рисунок 2.1, *а*) передбачають ланцюговий порядок вирішення проектно-конструкторських задач, коли вхідні умови для виконання кожного наступного етапу повністю визначаються результатами виконання попереднього етапу.

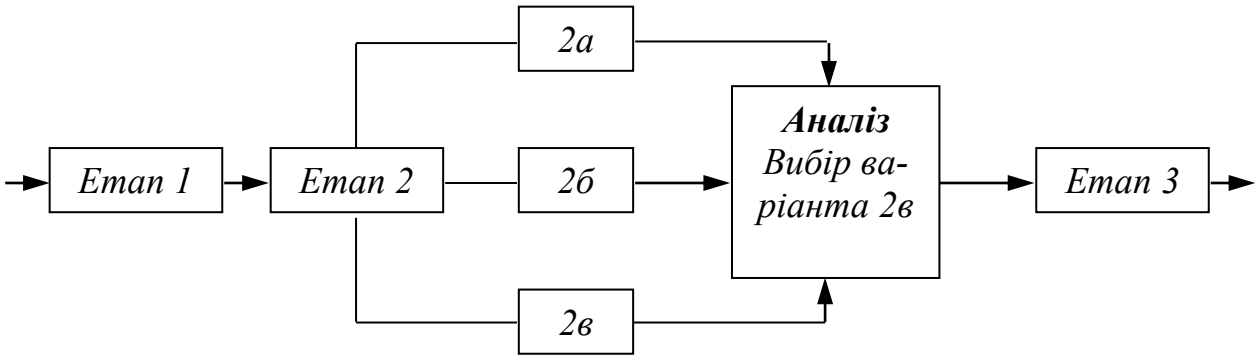
а – лінійна стратегія



б – циклічна стратегія



в – розгалужена стратегія



г – адаптивна стратегія

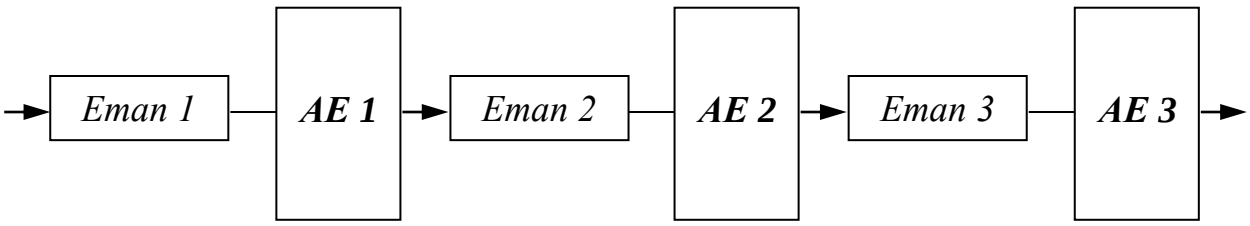


Рисунок 2.1 – До формування стратегії автоматизованого проектування ТЗ

Значного поширення при проектуванні ТЗ набули **циклічні стратегії** (рисунок 2.1, *б*), які передбачають проведення конструювання на основі організації ітераційних циклів наближення до потрібного рішення за заданими умовами. У практиці проектних установ, конструкторських бюро підприємств широко використовуються **розгалужені стратегії**

(рисунок 2.1, *в*). Вони передбачають особливий підхід до проведення найбільш важливих етапів конструювання нового ТЗ, який полягає у незалежному паралельному вирішенні відповідної конструкторської задачі за декількома можливими варіантами.

Як показує світовий досвід, найвища економічна ефективність САПР може бути досягнута на основі використання так званих **адаптивних стратегій** (рисунок 2.1, *г*). Їх перспективність використання у САПР визначається тим, що вони забезпечують формування раціональної стратегії пошуку оптимального рішення на основі аналізу наявної інформації. Схематично (дивись рисунок 2.1, *г*) при використанні адаптивних стратегій задається тільки перший крок (*етап 1*), а вибір кожного подальшого рішення, умов для виконання наступних етапів проектування визначається за результатами аналізу наявної інформації (*рішень, що отримані на відповідних адаптивних етапах – AE1, AE2,…*).

Сучасна методологія автоматизованого проектування базується на положеннях системного підходу і передбачає в межах обраної стратегії використання певних принципів і методів.

До **основних принципів проектування ТЗ** належать: **ієрархічність і декомпозиція** (*блочність*) опису об'єктів; **багатоетапність, ітераційність і оптимальність проектування**; **типізація, уніфікація** проектних рішень і засобів проектування.

Принцип **ієрархічності** передбачає структурування уявлень про об'єкт проектування за ступенем детальності описів – виділення відповідних **ієрархічних рівнів**. Принцип **декомпозиції** припускає ділення описів об'єкта на кожному ієрархічному рівні на ряд складових частин – **блоків** (*модулів*) із можливостями їх роздільного проектування.

Зазвичай ці принципи відображаються у вигляді блочно-ієрархічної схеми ТЗ, на якій виділяються встановлені ієрархічні рівні (*від нульового – власне об'єкта проектування в цілому, до рівня, що відповідає* ***базовим елементам****, описи яких не підлягають подальшому розподілу*). Причому на кожному з ієрархічних рівнів у процесі проектування використовуються свої поняття **системи** (*відповідні даному рівню композиційні блоки - об'єкти проектування*), **підсистеми** (*композиційні блоки більш*

низького рівня, що мають функціональні або структурні зв'язки з розглянутим як система об'єктом) і **надсистеми** (*об'єкти, що мають функціональні зв'язки з розглянутим як система об'єктом, але належать до більш високого ієрархічного рівня*). **При системному проектуванні** обов'язковим є виконання вимоги: *проектування підсистем повинне виконуватися за умов забезпечення заданих характеристик системи, що забезпечують одержання необхідних характеристик і показників функціонування надсистеми*.

Слід зазначити, що стосовно блочно-ієрархічної схеми об'єкта розглядаються два загальних методи: ***метод спадного проектування*** (*основний, пророблення конструкції ТЗ у напрямку від елементів верхніх ієрархічних рівнів – до базових елементів*) і ***метод висхідного проектування*** (*від базових елементів – до загальних рішень, як правило, використовується в задачах конструювання при модернізації ТЗ*).

Принципи **багатоетапності, ітераційності й оптимальності** відбивають організаційні особливості процесу проектування, а саме: процес проектування ТЗ реалізується поетапно, при цьому оптимальні проектні рішення досягаються на основі реалізації ітераційних циклів наближення за встановленими умовами конструювання.

У сучасній методології проектування велику роль відіграє принцип **типізації та уніфікації**. При цьому проектна процедура, призначена для багаторазового використання, називається **типовою**. Узагальнена класифікація типових проектних процедур наведена у вигляді схеми на рисунку 2.2.

Слід пам’ятати, що незважаючи на те, що типові процедури аналізу є інструментом відображення переважно функціонального, а процедури синтезу – структурного аспектів системного проектування, вони тісно взаємопов’язані (*проектні рішення, конструкції, що генеруються за допомогою процедур синтезу – досліджуються за допомогою процедур аналізу*).

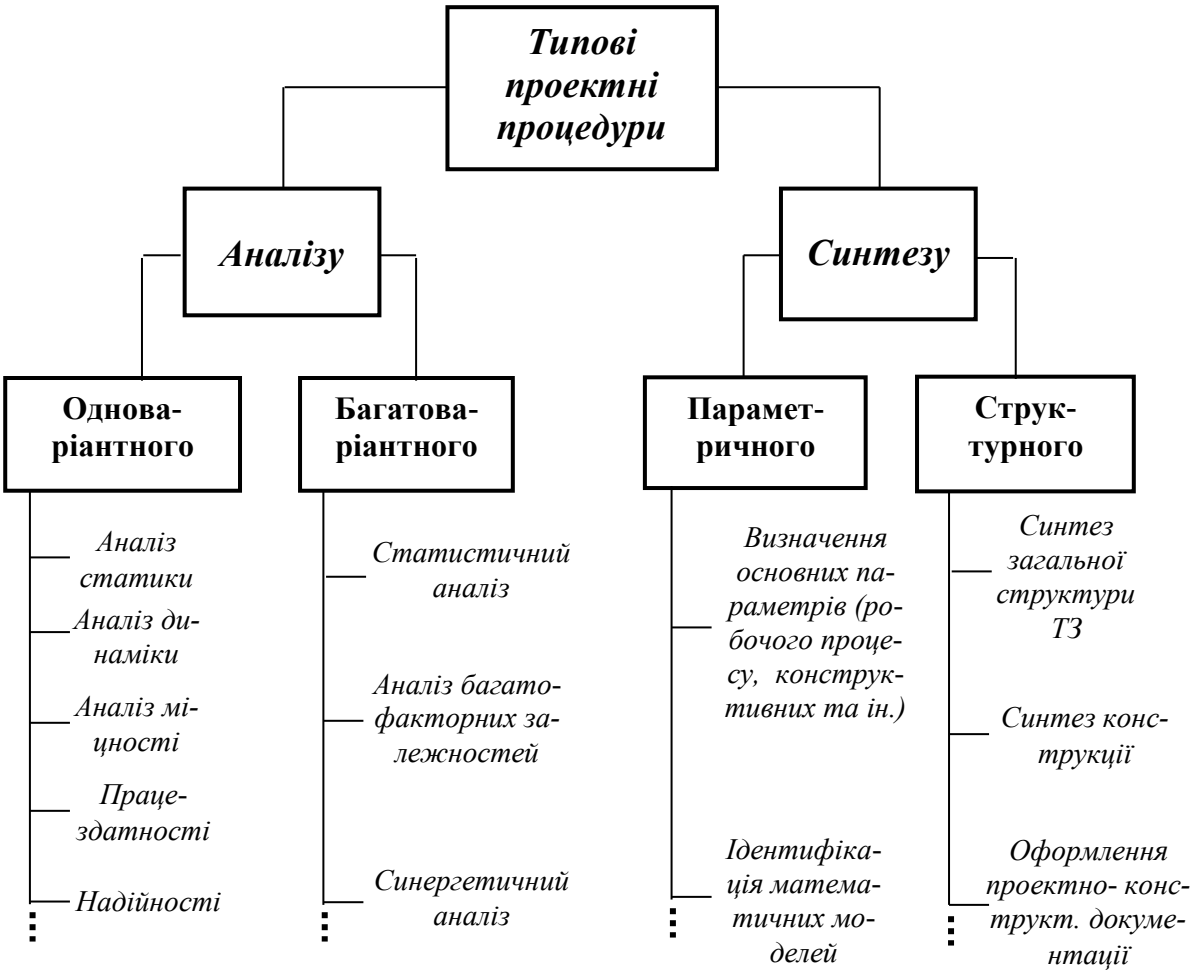


Рисунок 2.2 – Класифікаційна схема типових проектних процедур

З оглядом на зазначене, при конструюванні нових ТЗ необхідно дотримуватися ряду загальних правил (*вимог*), до яких належать:

1) **підпорядкування рішення проектно-конструкторських задач вимозі збільшення економічного ефекту від виробництва та експлуатації нового ТЗ**. При цьому орієнтирами проектування за умовами виробництва є: обґрунтоване використання різних конструкційних матеріалів, сучасних технологій (*спрямованість на зниження матеріаломісткості, трудомісткості й собівартості ТЗ*);

2) **урахування при проектуванні і конструюванні ТЗ соціальних аспектів:** задоволення вимог комплексної механізації та автоматизації (*зниження витрат ручної праці*), охорони праці і техніки безпеки, виключення можливості аварійних ситуацій через недбалу експлуатацію;

3) **прагнення до досягнення високого рівня новизни ТЗ, забезпечення резервів його подальшого удосконалення і розвитку** (*можливість створення похідних ТЗ на основі максимального використання агрегатів, вузлів, незалежних модулів конструкції і деталей базового ТЗ*);

4) **обмеження рівня застосування в нових ТЗ оригінальних деталей і вузлів**. Необхідно виключати їх використання в тих випадках, коли можна обійтися за рахунок застосування наявних стандартних і уніфікованих деталей і вузлів.

При розгляді й оцінці зазначених вимог до конструкції ТЗ варто враховувати:

1) збільшення продуктивності ТЗ, як правило, досягається шляхом підвищення швидкохідності. При цьому змінюються триботехнічні характеристики; збільшуються інерційні навантаження на деталі; змінюються показники віброактивності ТЗ;

2) зменшення маси деталей, вузлів (*спрямоване на зниження матеріаломісткості*) в більшості випадків призводить до зменшення їх міцності, жорсткості або стійкості, тобто до зниження працездатності;

3) створення простих, компактних, малогабаритних конструкцій у більшості випадків обмежується технічними і технологічними можливостями конкретного виробництва;

4) розбивання загальної конструкції ТЗ на окремі незалежні модулі, як правило, призводить до зниження жорсткості конструкції ТЗ і підвищення трудомісткості складання;

5) створення універсальних ТЗ виправдовує себе тільки при забезпеченні їх багатопланової експлуатації. Використання універсального ТЗ тільки для виконання однієї операції економічно недоцільне.

З розглянутого видно, що створення технічних засобів, які відповідають цим вимогам, пов'язане з необхідністю вирішення на високому рівні ряду складних проектно-конструкторських задач. При цьому доцільно використовувати сучасні методи проектування – конструювання ТЗ.

До таких методів, спрямованих на розробку загальної конструкції нового ТЗ, належать:

1 **Метод секціонування** – передбачає проектування (*побудову*) ТЗ з різними техніко-експлуатаційними характеристиками на основі використання (набору) однакових уніфікованих секцій. *Прикладами* ТЗ, при проектуванні яких використовувався розглянутий метод, є: ескалатори станцій метрополітену; широкий спектр транспортувальних машин (*ланцюгові, візкові конвеєри; стрічкові, скребкові, ківшові транспортери*); збірні сховища, гаражі та ін.

2 **Методи базового агрегату, агрегатування, комплексної стандартизації.**

Основу **методу базового агрегату** становить перетворення прийнятого як базовий агрегат ТЗ у технічні засоби різного призначення шляхом приєднання до нього (*навішування*) спеціального устаткування. *Наприклад*, використання як базовий агрегат автомобільного шасі дає змогу одержати такі ТЗ: бортовий автомобіль, самоскид, бензо- і водозаправник, автокран, бурову установку та ін.

Метод агрегатування полягає в конструюванні ТЗ на основі сполучення (*з різними кількостями і комбінаціями*) уніфікованих агрегатів (*блочно-модульний принцип побудови*). *Наприклад*, при проектуванні агрегатних верстатів як уніфіковані блоки широко використовуються поворотні столи, механізми синхронізації, корпуси загального призначення, тумби, приводні двигуни, гідропривод та ін.

Метод комплексної стандартизації подібний до методу агрегатування, але стосовно ТЗ найпростішого типу. *Наприклад*, деякі технологічні апарати і пристрої проектуються на основі використання стандартних виробів – резервуарів, відстійників, змішувачів, дозувальних пристроїв, фільтрів, секцій теплообмінників, запірно-регулювальної гідравлічної арматури та ін.

3 **Метод конвертування** передбачає конструювання нового ТЗ на основі вже наявного, частіше за все близького за реалізованими робочими процесами. *Прикладом* практичної реалізації цього методу є створення транспортних двигунів внутрішнього згоряння, що працюють замість бензину або дизельного палива на газі.

Слід зазначити, що в деяких ситуаціях (*як правило, екстремальних*) метод конвертування може застосовуватися і до конструювання об'єктів з істотними відмінностями в робочих процесах (*наприклад, створення поршневого компресора на базі наявного двигуна внутрішнього згоряння*).

4 **Метод модифікування** ґрунтується на створенні сімейства ТЗ (*різних модифікацій ТЗ*), пристосованих до різних умов роботи, без зміни основної конструкції ТЗ. *Наприклад*, сімейство дизелів типу Д49 об'єднує різні модифікації двигунів: тепловозні, судові, стаціонарні, автомобільні (*для кар'єрних самоскидів*).

5 **Метод компаудування** – широко застосовується при конструюванні сучасних транспортних ТЗ. Він припускає створення ТЗ, що характеризуються великою потужністю, надійністю і продуктивністю, на основі використання паралельного з'єднання двигунів, агрегатів, машин. *Наприклад*, два і більше двигунів на авіалайнерах, два головних дизелі на теплоходах та ін.

Слід відзначити, що після розробки загальної конструкції ТЗ здійснюються етапи конструювання відповідних вузлів, деталей, окремих елементів конструкції. При цьому вдале використання вже відомих і розробка оригінальних технічних рішень базується на застосуванні таких методів конструювання:

1 **Метод комбінування (*компонування*)** передбачає використання (*у різних сполученнях*) при розробці конструкції нового ТЗ окремих уже відомих (*С – старих*) і нових (*Н*) технічних рішень (*процесів, елементів конструкції*), у результаті чого досягається нова якість і додатковий позитивний ефект. При цьому можуть реалізовуватися такі схеми спільного використання нових і старих рішень: *Н + Н = Н; Н + С = Н; С + С = Н.*

У новій конструкції різні елементи можуть виконувати старі функції або набувати нові властивості, допускаються різні комбінації елементів (*комбінації механічних, гідравлічних, електричних елементів, багатоступінчастих конструкцій та ін.*). *Наприклад*, традиційним для транспортних дизелів є механічний привод клапанів, що базується на застосуванні кулачкового механізму (рисунок 2.3).

Нова конструкція такого привода може бути отримана шляхом реалізації схеми *С* + *С* на основі заміни механічного зв'язку (*ланок 2-4, дивись рисунок 2.3, а*) на широко застосовувану в техніці гідравлічну систему (*рисунок 2.3, б*), що містить гідравлічний насос *2* (*з приводом від того ж кулачка*), з'єднувальний трубопровід *3* і гідроциліндр *4*, що забезпечує необхідне переміщення клапана *5*.

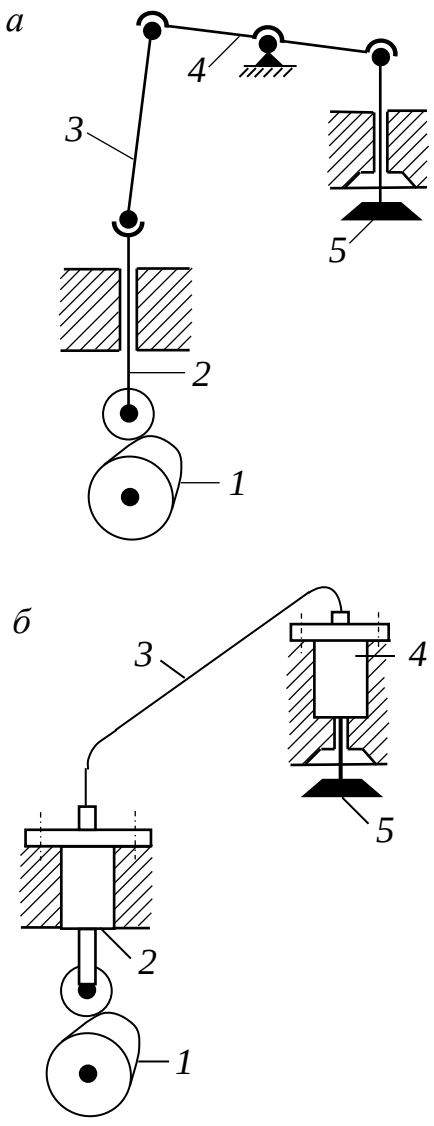


Рисунок 2.3 – До розглядання методу комбінування

2 **Метод інверсії** передбачає одержання нового технічного рішення на основі зміни (*зазвичай у діаметрально протилежному напрямку*) традиційного погляду на конструкцію існуючих об'єктів. Реалізується шляхом обертання функцій елементів конструкцій (*вихідні ланки – у вхідні, рухомі – у нерухомі та ін.*), форм (*поверхонь, що охоплюють, – у поверхні, що охоплюються*) і взаємного розташування (*вертикально – горизонтально, вертикально вгору – догори дном*) з метою надання новій конструкції ТЗ відповідних переваг.

Найбільше застосування одержав підхід, оснований на зміні форми і взаємного розташування поверхонь деталей, що контактують. *Приклади* реалізації такого підходу показані на рисунку 2.4. На рисунку 2.4, *а* показаний фрагмент конструкції механізму газорозподілу двигуна внутрішнього згоряння. Для забезпечення можливості регулювання теплового зазора в приводі з'єднання штанги *1* з важелем *3* в ньому використовується регулювальний гвинт *2*. При цьому охоплююча сферична поверхня гвинта контактує зі сферичним кінцевиком штанги. Більш довершена конструкція (*за умовами постійної наявності мастила на поверхні контакту*),

отримана інверсуванням форми поверхонь, що контактують, показана на рисунку 2.4, *б*.

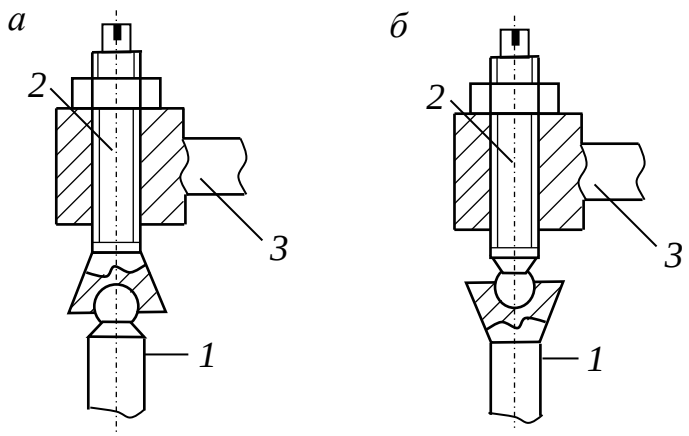


Рисунок 2.4 – До розглядання методу інверсії

3 **Метод аналогії** оснований на творчому використанні при конструюванні нових ТЗ технічних рішень з інших галузей науки і техніки, раніше розроблених ТЗ, а також особливостей будування, форми, звуків об'єктів живої природи (*наприклад, конструкція дельтапланів – крило птаха; корпуса підводних човнів – тіло дельфіна; маніпуляторів – рука людини та ін.*).

4 **Метод емпатії** використовується при розв'язанні складних конструкторських задач і базується на «*входженні в образ*», ототожненні особистості розроблювача з предметом дослідження (*процесом, елементом конструкції, складною деталлю*).

5 **Метод компенсації** передбачає врівноважування (*компенсацію*) небажаних і шкідливих факторів за допомогою впливів протилежної дії. Найбільш часто при конструюванні ТЗ виникає необхідність у компенсації впливу неврівноважених мас, інерції, тертя, теплових, гідравлічних та інших видів втрат. Для цього в конструкцію ТЗ вводяться спеціальні пристрої (*компенсатори*), що можуть бути з постійними параметрами, регульованими, автоматичними та ін.

2.2 Автоматизація функціонального і структурного проектування технічних засобів

Розглянуті раніше теоретичні аспекти системного підходу до вирішення проектно-конструкторських задач визначають належність останніх до відповідних етапів **функціонального** або **структурного проектування** ТЗ.

Функціональне проектування (ФП) спрямоване на вирішення трудомістких задач, що пов'язані з визначенням принципів побудови нового ТЗ та оцінкою очікуваних експлуатаційних показників і характеристик на основі дослідження процесів його функціонування.

Основою ФП є проектні процедури **аналізу**, за допомогою яких оцінюються вихідні показники функціонування ТЗ при різних значеннях його внутрішніх (*конструкційних*) і зовнішніх параметрів. При цьому до однієї з найважливіших задач ФП належить пошук оптимальних значень внутрішніх параметрів ТЗ з урахуванням вимог технічного завдання на його створення. Визначну роль у автоматизованому ФП відіграє математичне моделювання на ЕОМ з використанням функціональних математичних моделей.

Для успішного вирішення задач ФП має важливе значення **формалізований опис** загальної будови ТЗ – відображення його основних елементів (*модулів конструкції*) і функціональних зв'язків між ними.

Основними видами опису ТЗ на різних етапах ФП є нижченаведені:

1 Опис ТЗ у **вигляді блок-схеми** (рисунок 2.5), у прив'язці до якої розробляється відповідний аналітичний опис.

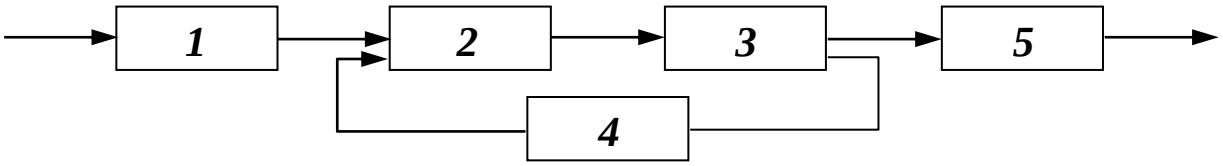


Рисунок 2.5 – До опису ТЗ у вигляді блок-схеми

Така блок-схема дає уявлення про структуру об'єкта, що розглядається (*кількість основних модулів конструкції 1,2,…5*), і загальні зв'язки (*механічні, гідравлічні, електричні, енергетичні чи інформаційно-керуючі*) між ними.

2 Опис ТЗ у **вигляді графів** (рисунок 2.6), де **вершини** графа відображають відповідні модулі конструкції, а **ребра** – зв'язки між ними. Порівняно з блок-схемами такі описи є більш компактними, що важливо при описі складних об'єктів.

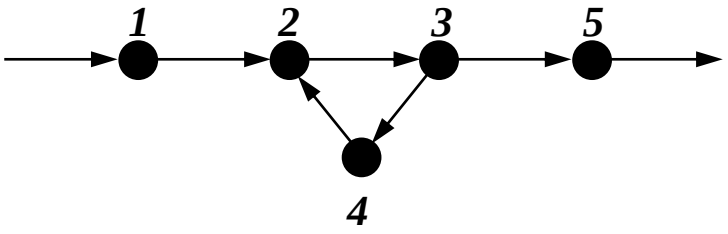
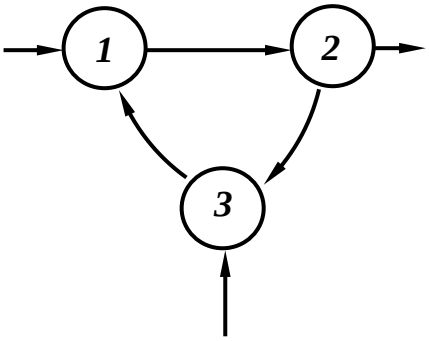


Рисунок 2.6 – До опису ТЗ у вигляді графа

З Опис ТЗ у **матричному (*табличному*) вигляді** (рисунок 2.7). Кількість і позначення рядків і стовпців матриці опису ТЗ відповідають наявним модулям загальної конструкції, а особливості зв'язків (*взаємодії*) між ними ураховуються відповідними знаками складових (*зовнішньому входу до кожного елемента відповідає* ***–1****, а виходу* ***+1***).



Матриця опису ТЗ

	1	***2***	***3***
1	-1	1	-1
2	-1	1	1
3	1	-1	-1

Рисунок 2.7 – До опису ТЗ у матричному вигляді

Розглянуті види формалізованих описів ТЗ є основою для розробки **функціональних математичних моделей** (*ФММ*). При цьому у САПР переважно використовуються описи у матричному вигляді.

Отримані при ФП технічного засобу результати є базою для **структурного проектування (СП)**, яке спрямоване на пошук технічних рішень, що забезпечують конструкторське відтворення принципових схем, робочих процесів, різноманітних характеристик у межах визначеної загальної будови ТЗ.

В основі СП лежать процедури **синтезу**, за допомогою яких генерується конкретна конструкція ТЗ, що проектується. За своєю складністю проектно-конструкторські задачі синтезу поділяються (*від найпростіших – до найскладніших*) на п’ять рівнів.

До **першого рівня** належать задачі, які потребують виконання тільки параметричного синтезу, а загальна конструкція (*структура*) об’єкта визначена або змістом технічного завдання, або результатами ФП.

До **другого рівня** належать комбінаторні задачі, коли синтез конструкції ТЗ здійснюється на основі повного перебору відомих технічних рішень, які містяться в кінцевих (*обмежених*) множинах.

До **третього рівня** належать конструкторські задачі, які не можуть вирішуватися шляхом повного перебору відомих технічних рішень з їх обмеженої множини, що пояснюється або можливостями існуючих технічних і програмних засобів, або відповідними обмеженнями (*часу, простору та ін.*).

До **четвертого рівня** належать задачі пошуку варіантів конструкції ТЗ в необмежених множинах технічних рішень.

До **п’ятого рівня** належать надскладні задачі синтезу конструкції ТЗ, рішення яких є проблематичними, бо синтез конструкції шляхом використання множин відомих технічних рішень є неможливим (*немає прототипів і аналогів*).

Слід зазначити, що залежно від типу **синтезуючих структур (*конструкцій*)** при автоматизованому проектуванні вирішуються задачі **одновимірного, схемного і геометричного синтезу**.

При **одновимірному синтезі** відбувається упорядкування елементів структури в одновимірних просторах (*наприклад, синтез маршрутів проектування, технологічних процесів виготовлення деталей та ін.*).

При **схемному синтезі** визначається структура (*загальна конструкція*) об’єкта без конкретизації його геометричних форм (*синтез структурних, кінематичних, функціональних, електричних схем та ін.*).

При **геометричному синтезі** відбувається конкретизація геометричних характеристик конструкції ТЗ, що проектуються, оформлюється відповідна конструкторська документація.

Головну роль у вирішенні розглянутих задач синтезу у процесі СП відіграє математичне моделювання на ЕОМ на основі використання відповідних **структурних математичних моделей** (*СММ*), для розробки яких використовуються відповідні формалізовані описи конструкції ТЗ.

Для опису конструкції одного ТЗ зручно використовувати відповідне **«І»-дерево**, фрагмент якого в узагальненому вигляді показаний на рисунку 2.8. Воно являє собою сукупність вершин і ребер, що їх пов'язують. Видно, що опис конструкції поділений на яруси (*ієрархічні рівні*), а вершини на кожному ярусі відображають відповідні складові частини ТЗ, що проектується.

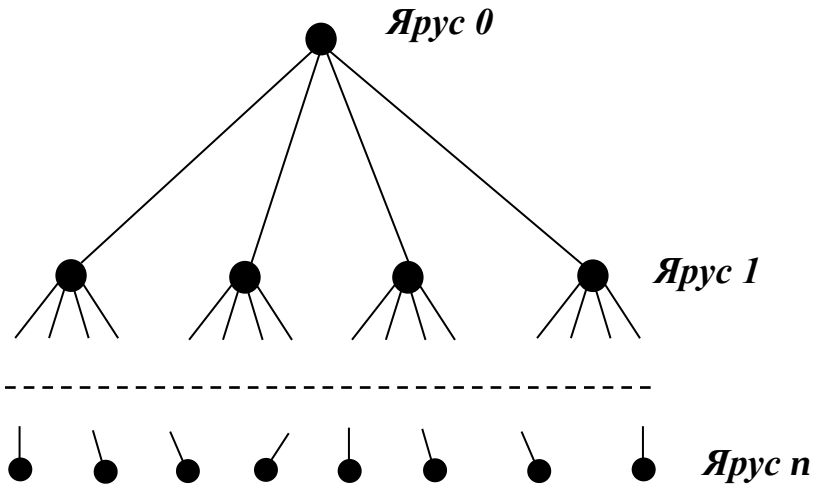


Рисунок 2.8 – Фрагмент **«І»-дерева**

Єдина вершина нульового ярусу називається **кореневою** – це сам проектований ТЗ (*наприклад, комбінований двигун внутрішнього згоряння*). Вона з'єднується ребрами з вершинами першого ярусу (*поршневий двигун, паливна система, система наддування, система охолодження та ін.*), кожна з яких – з'єднується з вершинами другого ярусу (*відповідними складовими частинами*). Нарешті, вершини n-го ярусу – **листя**, відповідають базовим елементам, що далі вже не діляться на складові (*поршень, колінчатий вал, гвинт та ін.*).

При створенні САПР у більшості випадків використовуються описи не одного ТЗ, а певного класу ТЗ. При цьому використовуються відповідні **«І-АБО»-дерева** (рисунок 2.9).

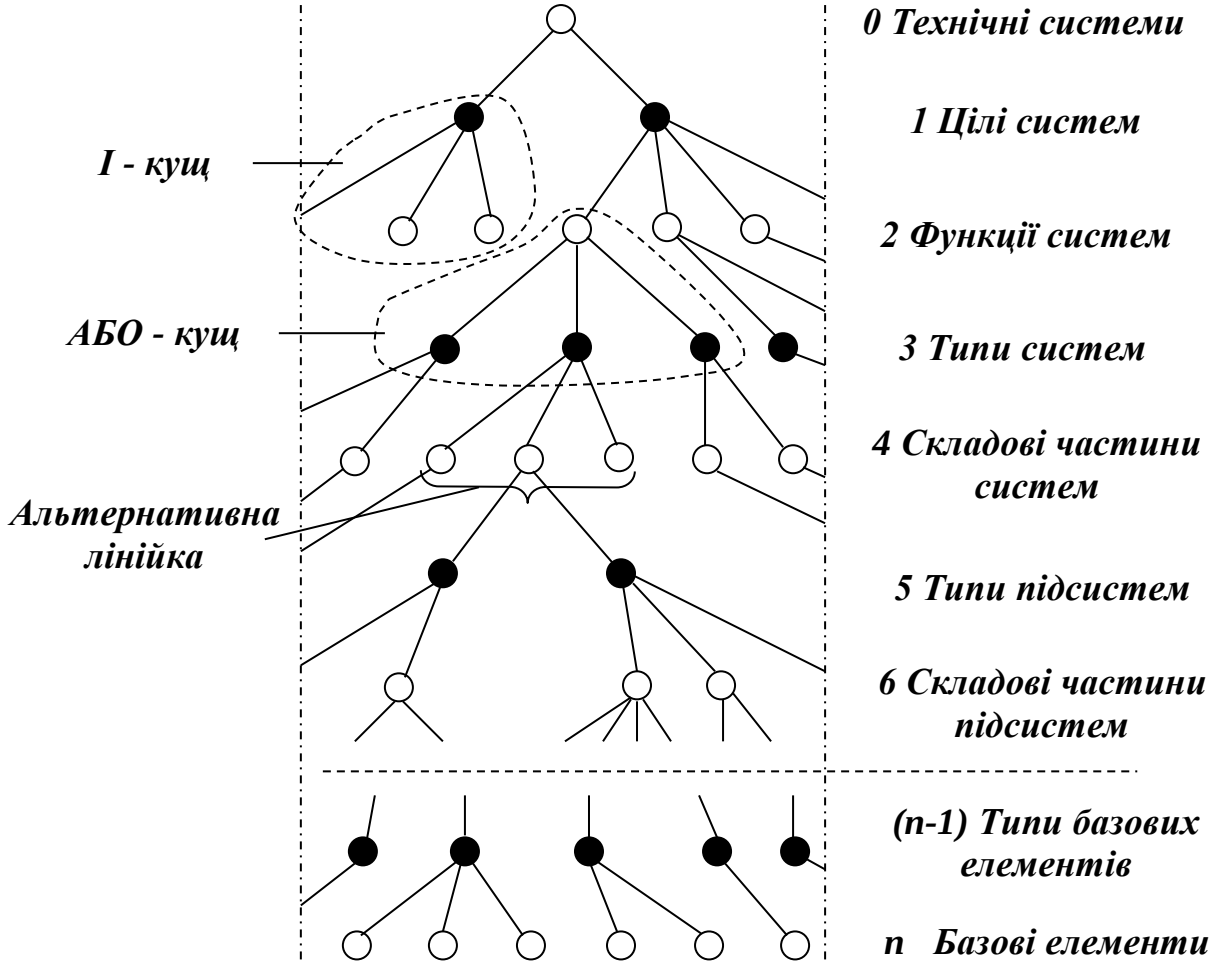


Рисунок 2.9 – Фрагмент «І-АБО»-дерева

В «**І-АБО**»-**дереві** коренева вершина відповідає певному класу ТЗ (*наприклад, локомотиви*). Вершини першого ярусу – цільовому призначенню окремих ТЗ (*локомотиви вантажні, пасажирські, маневрові*). Кожній такій вершині відповідають вершини другого ярусу – відображають властивості (*функції*) системи (*секційність локомотива, потужність та ін.*). Ці яруси можуть бути віднесені до ФП розглядуваного класу ТЗ.

Вершини нижчих ярусів використовуються для відображення блочно-ієрархічної структури ТЗ, тобто типів і складових частин ТЗ (*як системи*), відповідних підсистем, і так – до базових елементів.

При використанні «І-АБО»-дерев розглядаються окремі кущі. **Кущ типу «І»** – це частина дерева, яка складається з однієї вершини «І» і всіх з'єднаних з нею вершин «АБО» сусіднього нижнього ярусу»(*складових частин цієї вершини «І»*). **Кущ типу**

«АБО» об’єднує одну вершину «АБО» з усіма відповідними вершинами «І» нижнього ярусу.

Сукупність вершин «АБО» у кущі «І» отримала назву **альтернативної лінійки** (*альтернативні варіанти конструкційного модуля вершини «АБО»*).

2.3 Роль математичного моделювання при автоматизації проектування технічних засобів

При розв’язанні проектно-конструкторських задач зі створення нових технічних засобів на основі сучасної методології проектування особлива роль приділяється **математичному моделюванню**, яке поєднує процеси створення і дослідження на ЕОМ математичних моделей з метою одержання необхідних відомостей про ТЗ (*характеристик його функціонування, перебігу робочих та динамічних процесів, очікуваних техніко-економічних показників та ін.*). **Математичні моделі** (*ММ*) подаються у вигляді сукупності математичних об'єктів (*чисел, символів, множин*) і зв'язків між ними та відбивають найважливіші властивості ТЗ, що проектуються.

Математичні моделі, які розробляються і використовуються при проектуванні ТЗ, повинні відповідати багатьом вимогам, основними з яких є **універсальність, точність, адекватність і економічність**.

Універсальність ММ оцінюється можливостями математичної моделі з тим чи іншим ступенем повноти відображення (*моделювання*) властивостей реального ТЗ. Виконання цієї вимоги тісно пов'язане з метою математичного моделювання на конкретних етапах проектування (*необхідністю моделювання відповідних властивостей об'єкта*).

Точність ММ оцінюється ступенем збігу значень показників ТЗ, що моделюються, зі значеннями тих самих показників реального ТЗ.

Адекватність ММ оцінюється здатністю ММ відображати досліджувані властивості ТЗ з похибкою не вище заданої (*з заданою точністю*).

Економічність ММ характеризується витратами обчислювальних ресурсів (*переважно машинного часу і пам'яті*)

при математичному моделюванні на відповідних етапах проектування.

Математичні моделі, які забезпечують потреби у математичному моделюванні на різних етапах конструювання ТЗ, можуть бути згруповані за такими **класифікаційними ознаками**: характер властивостей об'єкта моделювання, що відображаються; належність до певного ієрархічного рівня опису; ступінь деталізації опису; спосіб одержання (*побудови*) ММ.

Залежно від характеру властивостей об'єкта проектування, що відображаються, ММ поділяються на ФММ і СММ.

Функціональні ММ орієнтовані на застосування при функціональному проектуванні ТЗ і забезпечують моделювання фізичних, інформаційних та інших процесів, що відбуваються у ТЗ при його функціонуванні.

Структурні ММ орієнтовані на використання при структурному проектуванні ТЗ і залежно від призначення підрозділяються на **топологічні і геометричні ММ.**

Топологічні ММ відображають наявність і взаємозв'язки складових елементів ТЗ. Використовуються при вирішенні важливих проектно-конструкторських задач: з пророоблення компонування ТЗ (*раціонального розміщення його основних агрегатів і елементів конструкції*); розміщення обладнання на заданих площах і в об'ємах; складання розкладів технологічних процесів та ін. **Геометричні ММ** відображають геометричні властивості об'єктів, містять (*на додаток до відомостей про взаємне розташування елементів*) описи геометричних форм деталей і включають: системи рівнянь ліній і поверхонь, різні алгебраїчні співвідношення, що описують робочі і допоміжні поверхні деталей; опис у вигляді графів і списків типових елементів конструкцій, етапів розробки й оформлення конструкторської документації.

Характерним для топологічних ММ є їх використання на вищих ієрархічних рівнях проектування ТЗ, а для геометричних ММ – на нижчих, більш деталізованих рівнях (*конструювання й оформлення конструкторської документації*).

За належністю до ієрархічного рівня розрізняють ММ на мікрорівні, макрорівні і метарівні.

Особливістю **ММ на мікрорівні** є опис процесів у ТЗ, що відбуваються у неперервному просторі і часі. Їх основою є відповідні системи диференціальних рівнянь у частинних похідних, незалежними змінними в яких є просторові координати і час. Більш широке розповсюдження в рішенні проектно-конструкторських задач одержали **ММ на макрорівні**, основані на використанні квазистатичних методів розрахунку і систем звичайних диференціальних рівнянь (*замість безупинного простору і часу – перехід до дискретних значень за функціональними ознаками*). Застосовуються при математичному моделюванні робочих, динамічних та інших процесів, що відбуваються у ТЗ. **ММ на метарівні** в основному розробляються для складних технічних систем, що поєднують об'єкти з різними принципами дії, орієнтовані на розв’язання задач управління такими системами (*наприклад, ММ локомотивного господарства, задачі автоматизування управління роботою локомотивів*).

Слід зазначити, що ММ на макро- і мікрорівнях можуть використовуватися як при структурному, так і при функціональному проектуванні ТЗ (*тобто належати до структурних чи функціональних ММ*).

За ступенем деталізації опису об'єкта проектування всередині одного ієрархічного рівня ММ підрозділяються на повні ММ і макромоделі (*узагальнені ММ*).

Повні ММ містять описи всіх елементів конструкції ТЗ і міжелементних зв'язків, найбільш повно відповідають вимогам універсальності, дають змогу проводити багатопланові дослідження. **Макромоделі** – математичні моделі, у яких містяться описи тільки обмеженої кількості основних елементів і зв'язків (*укрупнений опис об'єкта, без розкриття внутрішніх процесів і особливостей конструкції*).

За способом подання властивостей об'єкта виділяють аналітичні, алгоритмічні та імітаційні ММ.

Основою **аналітичної ММ** є явні аналітичні вирази виду $Y = F(Q, X)$, які описують зміну вихідних показників ТЗ як функції вхідних і внутрішніх параметрів. Такі ММ найбільш повно задовольняють критерій економічності, однак можуть створюватися лише для обмеженого кола простих ТЗ (*наприклад,*

ММ синусних, косинусних, тангенсних механізмів для моделювання їхніх кінематичних характеристик – на основі наявних аналітичних залежностей для обчислення переміщень, швидкостей і прискорень виконавчих ланок). **Алгоритмічні ММ** відображають зв'язок вихідних показників ТЗ із зовнішніми і внутрішніми параметрами у формі відповідних алгоритмів. Такі ММ переважно використовуються при проектуванні ТЗ і проведенні науково-дослідних робіт у цілому. При проектуванні ТЗ широко застосовуються **імітаційні ММ** – алгоритмічні ММ, що описують поводження досліджуваного об'єкта у часі при заданих зовнішніх впливах на нього (*імітують його роботу в заданих умовах*).

Важливою класифікаційною ознакою є спосіб одержання (*розробки, побудови*) ММ. У загальному плані для одержання ММ використовуються **неформальні** або **формальні методи.**

Неформальні методи використовують на різних рівнях проектування для отримання ММ окремих елементів, модулів конструкції, ТЗ у цілому на основі вивчення закономірностей процесів і явищ, що в них відбуваються.

Формальні методи передбачають отримання загальної ММ на основі існуючих математичних описів, залежностей та моделей.

Орієнтуючись на неформальні методи, **за способом одержання математичні моделі ТЗ поділяються на теоретичні й емпіричні ММ**.

Теоретичні ММ одержують на основі теоретичного дослідження внутрішньосистемних процесів і закономірностей, властивих розглянутому класу об'єктів ТЗ і явищ (*на теоретичній основі складається математичний опис усіх елементів ТЗ і зв'язків між ними*). На відміну від теоретичних, **емпіричні ММ** одержують на основі вивчення (*спостереження*) зовнішніх проявів властивостей ТЗ за допомогою вимірювань вхідних параметрів Q і відповідних вихідних показників Y з наступною обробкою результатів і одержанням емпіричної моделі (*залежності*) виду $Y = F(Q)$. Ці моделі набули широкого розповсюдження при проектуванні та конструюванні ТЗ і отримали назву **узагальнених** (*макромоделей, регресійних ММ*). При їх отриманні технічний засіб умовно подається у вигляді

«чорного ящика» (рисунок 2.10), у якому не розкривається механізм внутрішньосистемних процесів, що відбуваються у ТЗ.

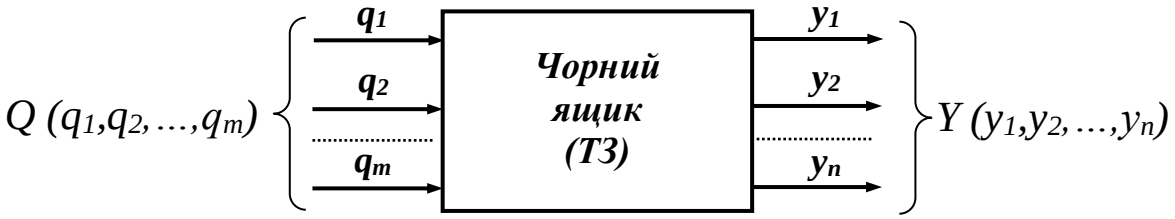


Рисунок 2.10 – До отримання узагальнених математичних моделей (*УММ*) технічних засобів виду $Y = F(Q)$

Доцільність використання таких УММ при вирішенні проектно-конструкторських задач визначається малими витратами часу і коштів на їх отримання, простотою і точністю математичних описів розглядуваних об'єктів, високою гнучкістю (*добре спряжуються з ММ різних ієрархічних рівнів*).

Одним з перспективних напрямків одержання УММ є використання сучасних методів **математичного планування експерименту (*МПЕ*)**. Ці методи передбачають проведення експериментальних або розрахункових досліджень на основі відповідного математичного плану, який задає визначену мінімальну кількість експериментів або розрахунків, необхідних для отримання простих і точних УММ.

У методичному плані отримання УММ з використанням методів МПЕ передбачає нижченаведену послідовність дій.

1 З урахуванням виду об'єкта і мети дослідження визначаються показники y_n, змінні параметри (*фактори*) q_m і вид УММ – $y_n = f(q_1, q_2, ..., q_m)$. Установлюються інтервали варіювання факторів, виконується їх нормування.

2 Залежно від кількості факторів q_m і виду УММ обирається (*із довідника з МПЕ*) відповідна матриця планування і складається математичний план проведення дослідження, який задає необхідні значення факторів q_m.

3 Відповідно до математичного плану проводиться експериментальне або розрахункове дослідження, формуються масиви отриманих показників y_n.

4 На основі відповідних масивів показників y_n визначаються параметри (*коефіцієнти*) УММ виду $y_n = f(q_1, q_2, ..., q_m)$.

Перевіряється (*за необхідності забезпечується*) адекватність отриманих УММ та оцінюється значущість їх коефіцієнтів.

5 Знайдені УММ використовуються при вирішенні проектно-конструкторських задач.

При виборі змінних факторів слід ураховувати, що згідно з математичним планом одночасно змінюються числові значення декількох факторів. Тому обрані фактори повинні відповідати таким основним вимогам:

- сумісності – всі комбінації значень факторів, які задаються за планом, повинні бути здійсненими і безпечними;
- незалежності – повинна забезпечуватися можливість установлення заданого значення фактора незалежно від значень інших факторів;
- відсутності лінійної кореляції (*взаємозв'язків*) між факторами.

Для універсального запису математичних планів (*матриць планування*) вводяться нормовані значення факторів x

$$x = \frac{q - q_н}{\Delta q},$$

де q_n – початковий (*нульовий*) рівень змінної q

$$q_н = \frac{q_{max} + q_{min}}{2},$$

де q_{max}, q_{min} – відповідно максимальне та мінімальне значення змінної q (*границі заданого інтервалу варіювання*);

Δq – крок варіювання змінної q

$$\Delta q = \frac{q_{max} - q_{min}}{k},$$

де k – кількість цілих ділянок, на які розбитий інтервал варіювання змінної q. Найчастіше $k = 2$, тобто змінні варіюються на трьох рівнях.

Найбільше поширення у практиці отримання УММ для проектування ТЗ набули ортогональні математичні плани другого порядку, використання яких передбачає одержання УММ у вигляді поліномів другого степеня

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^{m} a_i q_i + \sum_{i=1}^{m} a_{ii} q_i^2 + \sum_{\substack{i,j=1 \\ (i<j)}}^{m} a_{ij} q_i q_j .$$

З урахуванням того, що теорія МПЕ базується на методах математичної статистики, при проведенні експериментальних досліджень необхідно здійснювати **рондомізацію** експериментів, які задаються планом, – встановлювати випадкову черговість проведення експериментів за планом. При цьому доцільно використовувати довідкові таблиці випадкових чисел.

Коефіцієнти УММ визначаються за допомогою спеціальних програм, які забезпечують рішення системи нормальних рівнянь, наведених нижче, у матричній формі

$$C \cdot A = X_T \cdot Y,$$

де $C = X_T \cdot X$ – інформаційна матриця;

X – матриця планування;

X_T – транспонована матриця матриці X;

A – матриця-стовпець коефіцієнтів УММ;

Y – матриця-стовпець отриманих за планом значень (*масиву*) показника y_n.

Після визначення коефіцієнтів здійснюється перевірка адекватності УММ. У більшості випадків з цією метою розраховується величина дисперсії адекватності S_{ad} і контролюється умова $S_{ad} \le [S_{ad}]$. Для розрахунків S_{ad} використовується формула

$$S_{ад} = \pm\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - y_{ip})^2}{f_{ад}}},$$

де n – кількість заданих планом необхідних експериментів (*або розрахунків*);

y_i, y_{ip} – значення показника y, які отримані при i-му експерименті за планом і потім шляхом розрахунків за допомогою УММ;

$f_{ад} = n\text{-}m\text{-}1$ – кількість ступенів вільності $S_{ад}$ (m – *кількість змінних* q_m).

Більш універсальною є перевірка адекватності УММ за допомогою критерію Фішера F. Ознакою адекватності є виконання умови

$$F = \frac{S_{ад}^2}{S_y^2} \le F_{(0,05;\, f_{ад};\, f_y)},$$

де крім уже відомих:

$$S_y = \pm\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - y_{ip})^2}{f_y}} - \text{дисперсія відтворюваності;}$$

$f_y = n$ – кількість ступенів вільності S_y;

$F_{(0,05;\, f_{ад};\, f_y)}$ – табличне (*довідкове*) значення критерію Фішера при 5%-му рівні значущості для відповідних значень $f_{ад}, f_y$.

Досвід використання УММ при конструюванні ТЗ вказує на доцільність оцінювання значущості їх коефіцієнтів a_i, що дає змогу виділити роль того чи іншого фактора у формуванні величини показника y в розглядуваній області факторного простору. При використанні критерію Стьюдента до значущих відносять коефіцієнти a_i, для яких виконується умова

$$|a_i| \geq t_{(0,05;\, f_y)} \frac{S_y}{\sqrt{n}},$$

де крім уже відомих:

$t_{(0,05;\, f_y)}$ – табличне (*довідкове*) значення критерію Стьюдента, що відповідає 5%-й точці розподілення Стьюдента з f_y ступенями вільності.

2.4 Сучасні підходи до розробки математичних моделей механічних систем технічних засобів

При проектуванні нових транспортних ТЗ особлива роль приділяється математичному моделюванню характеристик функціонування (*відповідних законів руху*) основних елементів їхніх механічних систем (*основних механізмів двигуна, передатних механізмів та ін.*), що обумовлює необхідність розробки відповідних теоретичних математичних моделей.

Сучасний підхід до побудови таких ММ припускає виконання комплексу робіт, що відповідають трьом основним етапам.

На першому етапі складна механічна система (*механізм*), що містить велику кількість (*або декілька*) рухомих елементів (*ланок*) з різними масами і моментами інерції мас, на які діють численні сили і моменти сил, замінюється еквівалентною **динамічною моделлю (ДМ)** з такими ж інерційними і силовими характеристиками, як і замінна система. **На другому етапі**. складаються рівняння (*системи рівнянь*) руху, які у загальному уявленні погоджують інерційні, силові, пружно-дисипативні параметри ДМ із геометричними параметрами, що характеризують закон руху ДМ (*координатами, переміщеннями, швидкостями, прискореннями вихідних ланок*), закон руху відповідної механічної системи. **На третьому етапі** стосовно складених рівнянь руху і обраного числового методу їх розв’язання розробляється відповідна алгоритмічна ММ, що при задоволенні розглянутих раніше вимог може використовуватися для математичного моделювання законів функціонування механічної системи ТЗ, що проектується.

У свою чергу при розробці ДМ необхідно ураховувати відмінності у геометричних характеристиках руху механізмів, що розглядаються.

До ***основних геометричних характеристик руху*** *механізмів належить:*

1) геометрична передавальна функція положення $П_n$ (*вихідної ланки*).

Якщо q_n – координата, яка визначає положення вихідної ланки механізму, а q – його узагальнена координата, то $q_n = П_n(q)$. Вид $П_n$ для кожного механізму визначається геометричними зв'язками між його ланками;

2) геометрична передавальна функція швидкості $П_n^{'}$ (аналог швидкості): $П_n^{'} = \dfrac{dП_n}{dq}$. Тоді швидкість вихідної ланки $\dot{q}_n = П_n^{'} \cdot \dot{q}.$;

3) геометрична передавальна функція прискорення $П_n^{''}$ (*аналог прискорення*): $П_n^{''} = \dfrac{d^2 П_n}{dq^2}$, тоді $\ddot{q}_n = П_n'' \cdot \dot{q} + П_n' \cdot \ddot{q}$.

Слід зазначити, що при моделюванні процесів у високошвидкісних механізмах, як додаткову, розглядають **геометричну передавальну функцію прискорення другого порядку** $П_n^{'''}$ (*ривка, пульсу*): $П_n^{'''} = \dfrac{d^3 П_n}{dq^3}$.

Залежно від виду $П_n$ механізми, що входять до механічної системи двигунів внутрішнього згоряння, поділяються на такі:

1) **циклові механізми** – мають нелінійну функцію $П_n$ ($П_n^{'} \neq const$).

До них відносять кривошипно-шатунні механізми (*КШМ*), кулачкові механізми газорозподілу, паливні насоси високого тиску та ін.;

2) **передавальні механізми з постійними передавальними відношеннями** – мають лінійну функцію $П_n$ ($П_n = const$).

Для них $\dot{q}_n = П_n^{'} \cdot \dot{q}$, $\ddot{q}_n = П_n^{'} \cdot \ddot{q}$, $\dddot{q}_n = П_n^{'} \cdot \dddot{q}$. До них належать зубчаті механізми.

Найбільш складною є розробка ДМ для циклових механізмів двигунів внутрішнього згоряння (*ДВЗ*). Це визначається тим, що закони руху їх вихідних ланок чинять значний вплив на вихідні показники роботи двигуна в експлуатації. При цьому використання традиційних уявлень про структуру механізму, коли всі ланки розглядаються як абсолютно тверді й ураховуються тільки геометричні зв'язки кінематичних пар, дає змогу отримати тільки ДМ (*і відповідні ММ*) для моделювання **теоретичних законів їх руху**, які не витримуються в експлуатації внаслідок проявів реальних пружно-дисипативних властивостей ланок і зв'язків. Тому при моделюванні **реальних законів руху** необхідно при побудові ДМ ураховувати наявність у структурі механізмів ланок, що деформуються, з відповідними пружно-дисипативними властивостями.

Наприклад, у КШМ двигуна (рисунок 2.11) як найбільш деформовану ланку (*порівняно з колінчатим валом 1 і поршнем 3*) слід розглядати шатун *2*.

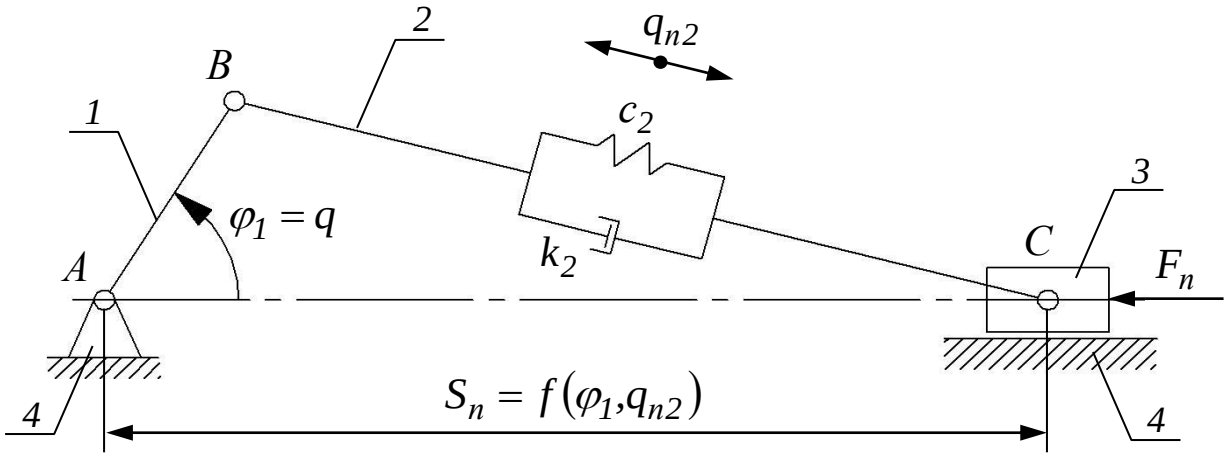


Рисунок 2.11 – До розглядання структури механізмів

При цьому науково-обґрунтованим є подання такої ланки у вигляді так званого пружно-в'язкого тіла Фойгта, що включає паралельне з'єднання пружного (*коефіцієнт жорсткості* c_2) і в'язкого (*коефіцієнт демпфірування* k_2) елементів.

Це визначає появу в роботі механізму (*особливості навантаження ураховуються приведеною силою* F_n) додаткової параметричної рухомості $q_{n2} = q_{n2}(c_2, k_2, F_n)$, яка визначає

динамічні відхилення у реальному законі руху поршня $S_n = f(\varphi_1, q_{n2})$ порівняно з теоретичним $S_n = П_n(\varphi_1)$.

Аналіз конструкції існуючих циклових механізмів ДВЗ показав, що в них ведучі (*вхідні*) і виконавчі (*вихідні*) ланки здійснюють обертальний або поступальний рух, мають значні маси і високу жорсткість (*можуть розглядатися як умовно тверді*).

Тому ***для побудови їх ДМ може використовуватися такий методичний підхід***:

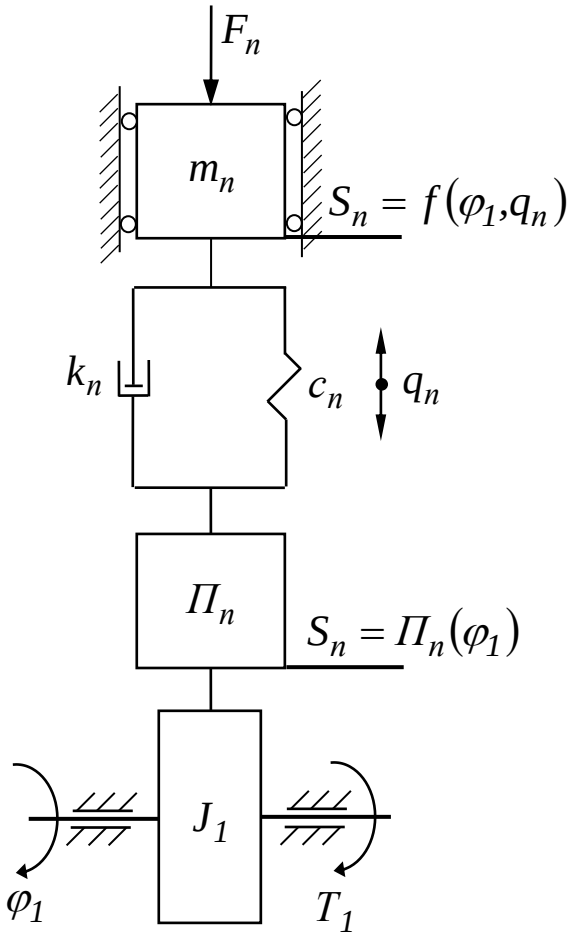
1) виділяються вхідні і вихідні ланки, до яких приводяться інерційні характеристики (*маси, моменти інерції мас*) усіх проміжних ланок механізму, а також діючі сили і моменти сил. У результаті ці ланки (*відповідні елементи ДМ*) еквівалентують інерційні і силові властивості всього механізму;

2) отримані інерційні елементи ДМ з'єднуються послідовним ланцюгом з двох безінерційних елементів, які ураховують особливості геометрії руху механізму (*символізується передавальною функцією положень* $П_n$) і прояв динамічних зв'язків (*символізується аналогом пружно-в'язкого тіла Фойгта з приведеними коефіцієнтами жорсткості* c *і демпфірування* k).

При використанні описаного підходу як приклад побудована ДМ одного відсіку КШМ, яка показана на рисунку 2.12.

Слід звернути увагу на те, що з цієї ДМ можна (*як окремий випадок*) отримати модель, що відповідає традиційним уявленням про структуру механізмів. Для цього з неї необхідно усунути аналог пружно-в'язкого тіла Фойгта, після чого ДМ буде забезпечувати моделювання тільки теоретичного закону руху – $S_n = П_n(\varphi_1)$.

Побудова ДМ є основою для розробки ММ функціонування механізму, що конструюється. Для неї складається рівняння руху, яке пов'язує відповідні геометричні параметри з інерційними і силовими параметрами ДМ.



m_n – приведена маса комплекту поршня і частини шатуна;
J_1 – приведений момент інерції мас колінчатого вала і шатуна;
F_n – приведена сила поршня;
T_1 – приведений момент сил колінчатого вала;
q_n – додаткова параметрична рухомість;
φ_1 – основна рухомість ($\varphi_1 = q$) механізму

Рисунок 2.12 – Динамічна модель КШМ

З урахуванням того, що різноманітні задачі динамічного дослідження можуть бути зведені до першої або до другої задач динаміки, побудування динамічних моделей доцільно виконувати з використанням відповідно *I* або *II* контурів ***динамічної структури механізмів (ДСМ)*** (рисунок 2.13). У рамках ***I*** контуру розв'язується перша задача динаміки, а саме при заданих законах руху ланок механізму визначаються навантаження. У свою чергу в рамках ***II*** контуру розв'язується друга задача динаміки, а саме визначаються реальні закони руху ланок механізмів, які перебувають під дією прикладених до них сил.

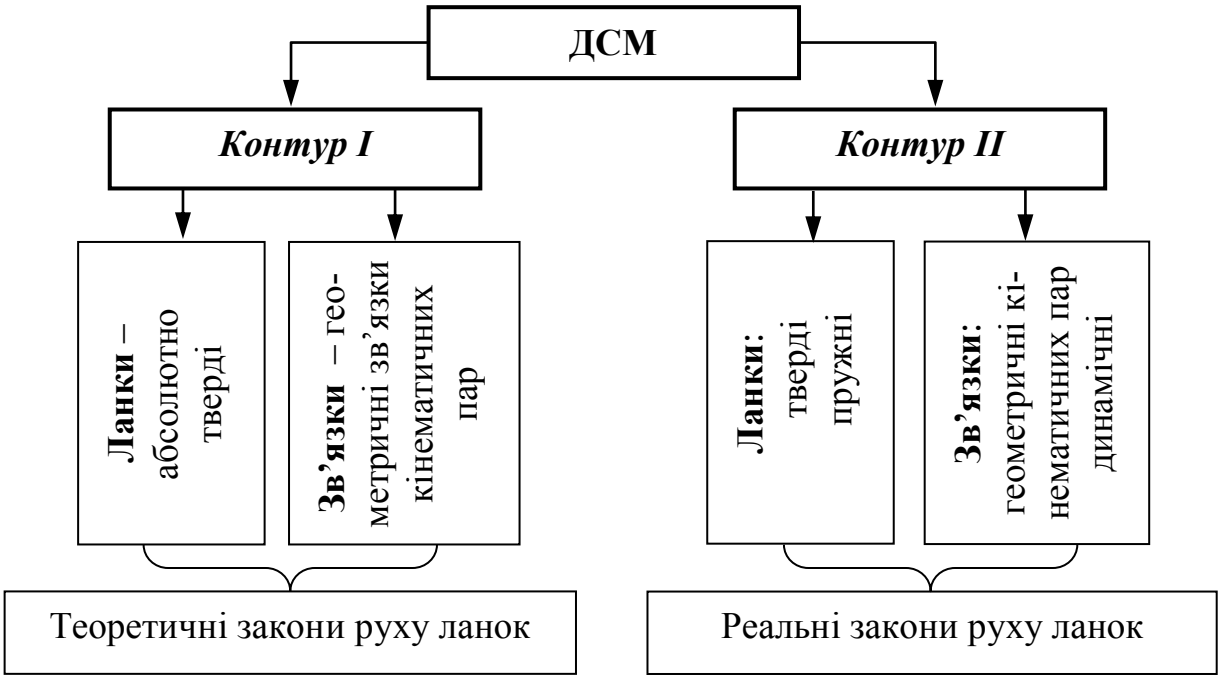


Рисунок 2.13 – До розглядання *I* та *II* контурів динамічної структури механізмів

2.5 Основи автоматизації проектування сучасних систем віброзахисту технічних засобів

При вирішенні проектно-конструкторських задач зі створення сучасних транспортних ТЗ значна увага приділяється математичному моделюванню їх вібраційних характеристик і, за необхідності, забезпеченню потрібного рівня віброзахищеності за рахунок конструювання відповідної системи віброзахисту.

Актуальність таких досліджень визначається тим, що за винятком ТЗ спеціальної вібраційної техніки (*вібротранспортери, вібромлини, віброзмішувачі, віброінструмент та ін.*) **вібрації** – прояви механічних коливань у рухомих технічних системах – шкідливо впливають як на роботу ТЗ (*порушення необхідних характеристик функціонування ТЗ, їх систем керування, поява додаткових інерційних навантажень, проблема відбудування від резонансу*), так і на обслуговуючий їх персонал або оточуючих людей (*порушення зору, слуху, анемія кінцівок, порушення біохімічного складу крові*). У свою чергу комплекс робіт зі зниження вібрацій ТЗ до необхідного рівня з точки зору їх нормальної роботи, а також з урахуванням впливу вібрацій на навколишнє середовище та людину отримав назву **віброзахисту**.

Тому при проектуванні транспортних ТЗ повинна виконуватися оцінка їх віброзахищеності, яка може бути зведена до контролю умови отримання **коефіцієнта віброзахисту** $\gamma < 1$. У свою чергу цей коефіцієнт являє собою відношення взятих за модулем максимальних амплітуд об'єкта віброзахисту $\left|Z_{max}^{OB}\right|$ та джерела вібрацій $\left|Z_{max}^{ДВ}\right|$: $\gamma = \dfrac{\left|Z_{max}^{OB}\right|}{\left|Z_{max}^{ДВ}\right|}$.

Видно, що для проведення оцінки віброзахищеності ТЗ необхідно, ще на етапі проектування, моделювати динамічні характеристики, які описують його коливання (*вібрації*), для чого потрібна відповідна ММ.

Розглянемо основні етапи побудови ММ для дослідження вимушених вертикальних коливань, наприклад тепловозного дизеля, схема установки якого на рамі тепловоза показана на рисунку 2.14, *а*.

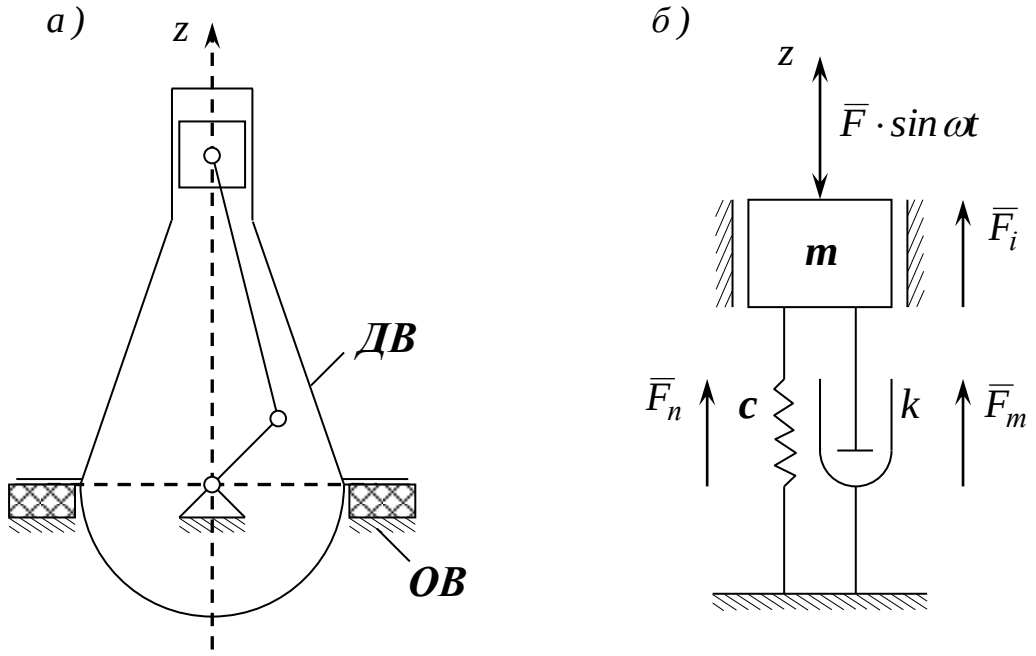


Рисунок 2.14 – Схема та динамічна модель дизеля для дослідження його вертикальних коливань

На першому етапі складна механічна система замінюється еквівалентною динамічною моделлю (рисунок 2.14, *б*) з такими параметрами:

m – зведена маса (*характеризує інерційні властивості дизеля*);

c – зведена жорсткість (*характеризує пружні властивості дизеля* [*ураховує жорсткість пружних елементів конструкції*]);

k – зведений коефіцієнт демпфірування (*характеризує дисипативні властивості дизеля* [*ураховує в'язкі опори в коливальній системі*]);

$F \cdot \sin \omega t$ – збурююча сила;

ω – колова частота вимушених коливань;

F_i – вектор сил інерції;

F_n – сила пружності ланок;

F_m – сила тертя.

На другому етапі відповідно до принципу Д'Аламбера складається рівняння руху

$$\overline{F_i} + \overline{F_m} + \overline{F_n} = \overline{F} \cdot \sin \omega t .$$

Запишемо це рівняння як

$$m \cdot \ddot{z} + k \cdot \dot{z} + c \cdot z = F \cdot \sin \omega t ,$$

де $\ddot{z}, \dot{z}, z$ – віброприскорення, віброшвидкість, вібропереміщення відповідно.

Поділимо першу та другу частини рівняння на масу m:

$$\ddot{z} + 2 \cdot n \cdot \dot{z} + \omega_0^2 \cdot z = \frac{F}{m} \cdot \sin \omega t ,$$

де $n = \frac{k}{2m}$ – коефіцієнт, який ураховує загасання вільних (*власних*) коливань системи;

$\omega_0 = \sqrt{c/m}$ – колова частота власних коливань системи.

Розв'язок рівняння руху відомий і може бути поданий у вигляді

$$z(t) = z_0 \cdot e^{-nt} \cdot \sin(\omega_0 t + \varepsilon) + \frac{F \cdot \sin \omega t}{m \cdot \sqrt{\left(\omega_0^2 - \omega^2\right)^2 + 4n^2\omega^2}}.$$

У початковий період коливальна система перебуває в складному полігармонічному русі, тобто виконує вільні коливання з частотою ω_0, амплітудою z_0 та початковою фазою ε, а також вимушені коливання з частотою ω.

Видно, що перша складова наведеного рівняння руху відповідає власним коливанням системи, а друга – вимушеним. При цьому власні коливання системи порівняно з вимушеними, як правило, є малими, тому ними можна знехтувати. У цьому випадку **максимальну амплітуду** коливань механічної системи можна визначити як

$$z_{max} = \frac{F}{m \cdot \sqrt{\left(\omega_0^2 - \omega^2\right)^2 + 4n^2\omega^2}}.$$

Для системи, у якій коефіцієнт, що ураховує загасання коливань, дорівнює нулю $(n = 0)$, тобто системи без тертя, наведене рівняння набуває такого вигляду:

$$z_{max}^{n=0} = \frac{z_{cm}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2},$$

де z_{cm} – максимальне переміщення системи при статичній дії сили F:

$$z_{cm} = \frac{F}{m \cdot \omega_0^2}.$$

Використовуючи отримані формули, можна виконати обчислення z_{max} при різних значеннях відношень частот ω / ω_0 і коефіцієнтів n. Узагальнено результати таких обчислень подані графічно на рисунку 2.15.

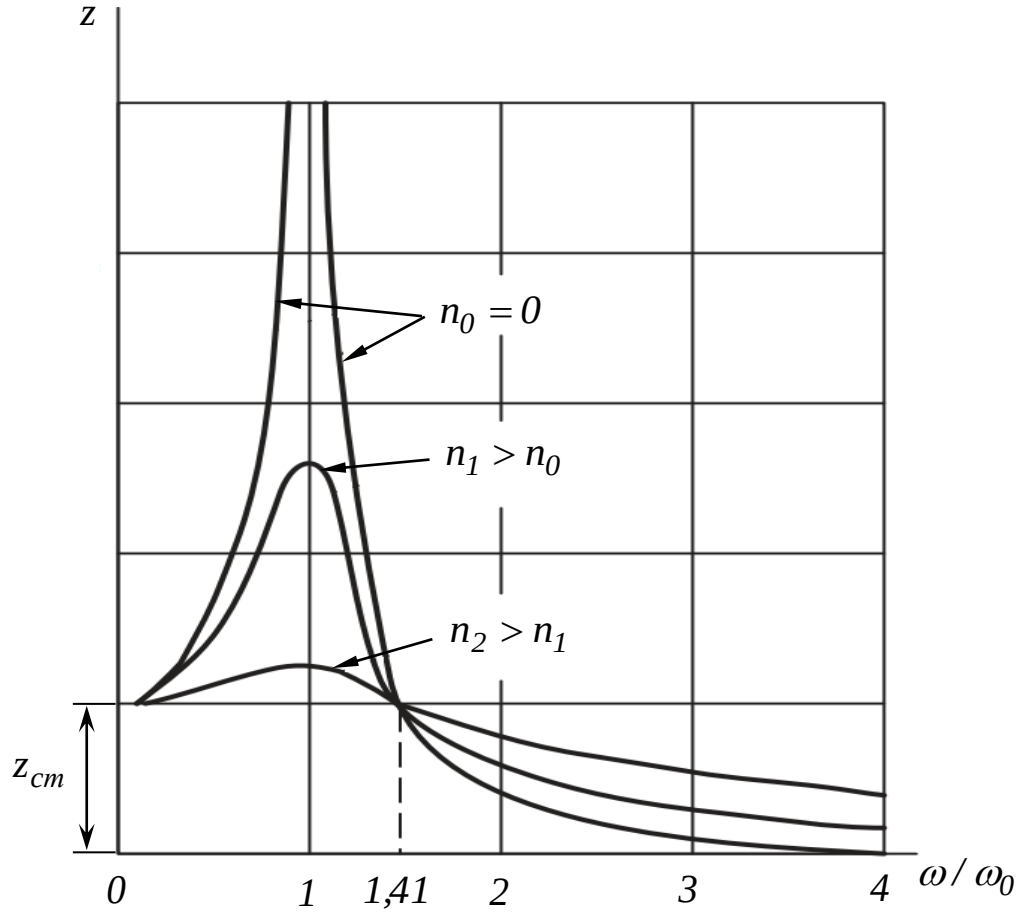


Рисунок 2.15 – До оцінки впливу тертя в системі на максимальні амплітуди коливань

Видно, що в системі без тертя, при відношенні частот $\omega / \omega_0 = 1$ спостерігається явище резонансу (*теоретично максимальна амплітуда* z_{max} *зростає до нескінченності*) і тільки при значенні $\omega / \omega_0 = 1{,}41$ амплітуда коливань не перевищує величину z_{cm}. Це визначає доцільність призначення експлуатаційних режимів роботи ТЗ при значеннях $\omega / \omega_0 = 2....5$.

Введення тертя в систему ($n_1 > n_0$) призводить до зменшення максимальної амплітуди до відповідного кінцевого значення. Тому забезпечення необхідної умови $\gamma < 1$ може бути досягнуто шляхом додаткового введення тертя ($n_2 > n_1$) у конструкцію коливальної системи, а саме використання відповідної системи віброзахисту. При значному збільшенні тертя ($n = n_{кр}$) може настати критичне демпфірування (*періодичні коливання перетворюються в аперіодичні*).

При конструюванні транспортних ТЗ у напрямку віброзахисту використовують системи, які передбачають **віброізоляцію** віброактивних об'єктів або **віброгасіння** відповідних вібрацій.

Системи віброізоляції передбачають ізолювання віброактивного модуля конструкції або ТЗ у цілому від сусідніх модулів, рами транспортного засобу, елементів будівельних споруд. Прикладами таких рішень є: встановлення транспортних ДВЗ на гумово-металевих салінг-блоках (*зменшення передачі вібрацій на раму, кузов транспортного засобу*); конструювання фундаментів стаціонарних віброактивних ТЗ на гумових подушках із зазорами між фундаментом і основним ґрунтом (*зменшення передачі вібрацій на будівельну споруду*); конструювання вібропоглинаючих крісел для водіїв і пасажирів транспортних засобів.

Системи віброгасіння поділяються на **статичні і динамічні**. **Статичні системи віброгасіння** передбачають:

1) введення у конструкцію ТЗ елементів, що збільшують в'язкий опір у коливальних процесах, які відбуваються у ТЗ. Це різноманітні гідравлічні і пневматичні демпфери (*амортизатори*), демпфери сухого тертя (*ресори*), електромагнітні демпфери та ін.;

2) конструювання і використання у віброактивних механізмах спеціальних багатошарових деталей, у яких тертя між сусідніми шарами збільшує в'язкий опір коливальним процесам (*наприклад, багатошарові телескопічні конструкції валів, що забезпечують зменшення їх крутильних коливань*);

3) проектування і конструювання ТЗ за умов отримання низького початкового рівня віброактивності. *Прикладами практичної реалізації цього напрямку* є використання самоврівноважуючих кінематичних схем механізмів (*ДВЗ з опозитним розташуванням циліндрів*), конструктивне зрівноваження ланок і механізмів за допомогою противаг, балансування роторів та ін.

Динамічні (*активні*) системи віброгасіння передбачають використання спеціальних пристроїв (*з жорстким або адаптивним керуванням*) – віброгасників, що створюють зустрічні динамічні впливи до діючих вібрацій і зменшують їх прояв (*найпростішим прикладом таких систем є механічна зубчато-важільна система Ланчестера*).

3 АВТОМАТИЗАЦІЯ ОПТИМІЗАЦІЙНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ

3.1 Постановка і вирішення задачі оптимізаційного проектування

Прагнення до створення нових ТЗ, які втілюють у собі оптимальні технічні рішення і забезпечують отримання високих техніко-економічних показників, зумовлює необхідність використання при їх проектуванні основаних на теорії оптимізації підходів і методів та виконання **оптимізаційного проектування** ТЗ з використанням можливостей САПР.

У цілому теорія оптимізації спрямована на знаходження та ідентифікацію найкращих варіантів з безлічі наявних альтернативних рішень за допомогою відповідних числових методів, використання яких дає змогу не виконувати в процесі пошуку повне перебирання й оцінювання всіх можливих варіантів. У свою чергу оптимізація (*як раціональна процедура*) можлива лише при наявності різних альтернативних варіантів рішення поставленої задачі і відповідного **критерію оптимальності**, за величиною якого здійснюється вибір оптимального варіанта.

Укрупнено постановку і раціональне рішення задач оптимізаційного проектування ТЗ виконують у такій послідовності:

1) визначаються **границі оптимізації** ТЗ (*обмежується область пошуку оптимального рішення*). Вони задаються межами зміни (*інтервалами варіювання*) зовнішніх вхідних параметрів;

2) виділяються **ключові оцінки оптимальності**, вибираються відповідні критерії оптимальності (*формується вектор критерійних показників* Y), на основі яких можна оцінювати різні варіанти і знаходити «найкращий» з них. При цьому найбільш часто вибір критеріїв базується на одній з двох оцінок оптимальності. **Перша** – виражається умовою одержання обговореного технічного рішення при мінімальних витратах – визначає вибір **критеріїв економічного характеру**. До них належать: матеріаломісткість, трудомісткість, собівартість, витрати машинного часу, витрати на виробництво та ін. **Друга** –

виражається умовою одержання максимального ефекту за обговореними показниками роботи ТЗ при виконанні всіх обмежень, що накладаються, – визначає вибір **технічних критеріїв**, пов'язаних з показниками технічного рівня ТЗ (*наприклад, потужність, рівень форсування, питома ефективна витрата палива, механічний ККД, показники токсичності транспортного дизеля, запас міцності, надійність, вібростійкість та ін.*);

3) здійснюється вибір внутрішніх параметрів ТЗ (*його конструкції*), що суттєво впливають на значення розглянутих критеріїв оптимальності, формується **вектор керованих змінних** $X(x_1,x_2,....,x_n)$. При цьому доцільно прагнути до якомога меншої кількості таких змінних (відбирати тільки найвпливовіші).

4) виконується формування **цільової функції (функції відгуку)** і математичний запис поставленої оптимізаційної задачі. Цільова функція (*ЦФ*) подається у вигляді залежності $y = F(x)$, що відбиває зв'язок обраного основного критерію оптимальності y з розглянутими внутрішньосистемними змінними параметрами x. Тоді запис оптимізаційної задачі можна подати в загальному вигляді: $F(x) \to extremum$, $x \in Д$.

Такий запис відбиває підпорядкованість дослідження ЦФ пошуку її екстремальних значень (*max* чи *min*) за умови перебування розглянутих значень змінних X в області оптимізації $Д$;

5) розробляється ММ для дослідження ЦФ (*визначення і порівняння показників y з різними варіантами значень x*) на ЕОМ. Розв'язується поставлена задача оптимізаційного проектування – відшукується оптимальний варіант технічного рішення (*конструкції ТЗ*).

З позицій теорії оптимізації задачі оптимізаційного проектування ТЗ можна укрупнено поділити на задачі **одновимірної** (*прямої*) і задачі **багатовимірної оптимізації**.

Одновимірна оптимізація характеризується виділенням одного критерію оптимальності y і однієї незалежної змінної X, що визначає його величину. При цьому відома ЦФ виду $y = F(x)$, де змінний внутрішній параметр x належить до множини $X(x \in X)$. Якщо значення $x_{опт}$ відповідає мінімуму ЦФ, то

розв'язувана задача оптимізаційного проектування може бути подана у вигляді: $F(x) \to min$, $x \in X$.

Прикладом практичного використання прямої оптимізації при конструюванні ТЗ може служити *рішення задачі оптимізації конструкції одноступінчатого зубчатого редуктора за критерієм його мінімальної маси*. Такий редуктор (рисунок 3.1, *а*) складається із зубчатих коліс *1* і *2*, призначених для перетворення вхідних значень кількісті оборотів вала n_1 і потужності P_1 у необхідні вихідні значення n_2 і P_2.

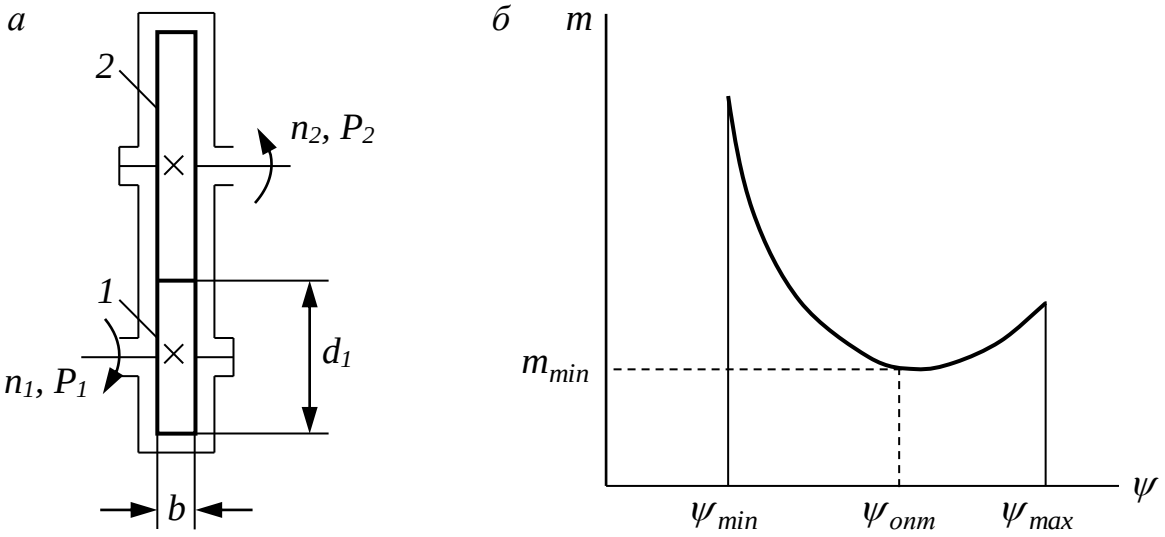


Рисунок 3.1 – До прикладу прямої оптимізації конструкції одноступінчатого зубчатого редуктора

Як критерій оптимальності розглядається маса редуктора m. Визначальний вплив на значення обраного критерію чинить параметр $\psi = b/d_1$ (відношення ширини зубчатого вінця b до ділильного діаметра шестірні d_1). Тоді конкретизований запис розглядуваної задачі оптимізації конструкції редуктора набуває вигляду: $F(x) = m(\psi) \to min$, $\psi \in \Psi[\psi_{min}; \psi_{max}]$.

Алгоритм обчислення наданої ЦФ відомий, що дає змогу за допомогою відповідної ММ визначити її значення в заданому інтервалі варіювання параметра ψ і з них вибрати $\psi_{опт}$. Графічна інтерпретація рішення розглянутої оптимізаційної задачі наведена на рисунку 3.1, *б*.

Більш складним випадком прямої оптимізації, яка характерна для рішення ряду техніко-економічних задач при проектуванні ТЗ, є **пряма оптимізація за критеріями з протилежними функціями відгуку**. Зокрема оптимізація конструкції ТЗ з метою забезпечення прийнятних витрат на його виробництво $З_в$ і експлуатацію $З_е$ при відповідному рівні надійності, який оцінюється значеннями ймовірності безвідмовної роботи об'єкта P_t (*рисунок 3.2*).

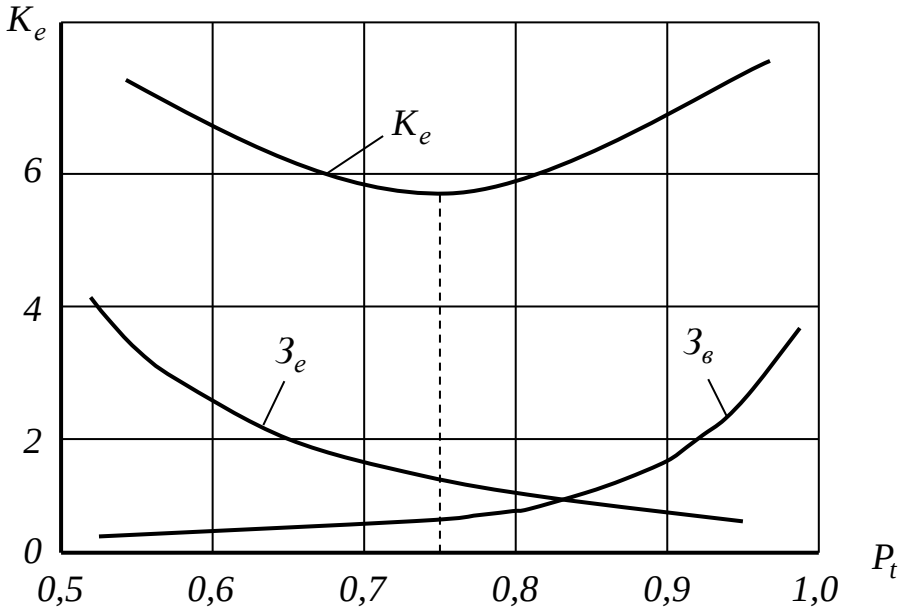


Рисунок 3.2 – До прикладу оптимізації за критеріями з протилежними функціями відгуку

Задача зводиться до пошуку значення $P_{t\,опт}$, при якому одночасно забезпечуються прийнятні рівні витрат $З_в$ і $З_е$. Складність рішення такої задачі обумовлена тим, що критерії $З_в$ і $З_е$ мають протилежні функції відгуку – $З_в = f_1(P_t)$ і $З_е = f_2(P_t)$. Дійсно, забезпечення більш високих значень P_t супроводжується збільшенням витрат на виробництво (*підвищення вимог до запасів міцності, характеристик конструкційних матеріалів, технології обробки та ін.*). Але в той же час це забезпечує зменшення експлуатаційних витрат на обслуговування та ремонт.

При рішенні таких оптимізаційних задач вводиться в розгляд інтегральний економічний критерій надійності: $K_e = (З_в + З_е)/T$

(*де T – період експлуатації ТЗ*) і задача оптимізації подається у вигляді

$$F(x) = K_e(P_t) \to min, \quad P_t \in P_t[0{,}5;1{,}0].$$

Ознакою задач **багатовимірної оптимізації** є необхідність одночасного розглядання багатьох критерійних показників і значної кількості змінних параметрів, які на них впливають. У загальній постановці метою оптимізаційного проектування ТЗ є визначення відповідного вектора керованих параметрів $X^*(x_1, x_2, x_3, ..., x_n)$, названого оптимальною точкою, при якій цільова функція $F(x)$ набуває значення $F(x^*)$ (*значення ЦФ в оптимальній точці*).

На підставі того, що ЦФ повинна описувати зміну одного критерію оптимальності, необхідно здійснювати **згортку векторного критерію** – *зведення багатокритерійної задачі до однокритерійної*. Це передбачає виділення при проектуванні ТЗ з багатьох критеріїв одного, який найбільш повно відбиває ефективність проектованого об'єкта – **основного (першорядного, головного) критерію оптимальності** $y_{осн}$. Тоді ЦФ подається у вигляді залежності основного критерію від керованих параметрів – $y_{осн} = F(x)$. Інші критерії розглядаються як **вторинні** і подаються у вигляді функціонально залежних від керованих змінних показників – **функціональних обмежень.**

При багатовимірній оптимізації керовані параметри визначають значення **прямих (параметричних) і функціональних обмежень**. Прямі обмеження відбивають інтервали варіювання змінних. Задаються, наприклад, у вигляді $[x_{i\,min}, x_{i\,max}]$ чи $x_{i\,min} \le x_i \le x_{i\,max}$, де $x_{i\,min}, x_{i\,max}$ – відповідно мінімальне і максимальне значення параметра x_i. Вони визначають (*обмежують*) область оптимізації – область можливих рішень $Д$ без урахування функціональних обмежень.

У загальному записі область $Д$ може бути подана у вигляді

$$Д = \{ X \,|_{x_i \ge x_{i\,min}, x_i \le x_{i\,max}, i \in [1:n]} \}.$$

Функціональні обмеження описують зміни і вимоги до значень вторинних критеріїв і подаються у формі рівностей виду

$\psi(x)=0$ чи нерівностей $\varphi(x)>0$. Вони формують (*виділяють*) в області можливих рішень $Д$ область $Д_x$ – область припустимих рішень, у якій і міститься оптимальне (*прийнятне*) рішення. При цьому область $Д_x$ може бути подана у вигляді

$$Д_x = \{ X \big|_{\psi(x)=0, \varphi(x)>0, x_i \geq x_{i\,min}, x_i \leq x_{i\,max}, i \in [1:n]} \}.$$

Тоді загальний запис задачі багатовимірної оптимізації набуває вигляду

$$F(x) \to extremum, \quad x \in Д_x.$$

3.2 Сучасні методи оптимізації

Особлива роль у рішенні задач оптимізаційного проектування ТЗ відводиться сучасним методам пошуку оптимальних проектно-конструкторських рішень, які базуються на відповідних дослідженнях ЦФ. У класичній постановці (*за теорією оптимізації*) такі методи спрямовані на пошук екстремальних значень ЦФ (*визначення наявності, виду і координат екстремальних точок*). Якщо пошук екстремуму ЦФ $F(x)$ здійснюється в необмеженій області зміни керованих параметрів $X(x_1, x_2, x_3, ..., x_n)$, знайдений екстремум називається **безумовним**, якщо в обмеженій (*що характерно для задач проектування ТЗ*) – **умовним**. При цьому варто враховувати, що ЦФ може бути **одноекстремальною (*унімодальною*)** і **багатоекстремальною**. У зв'язку з цим стосовно багатоекстремальних ЦФ будь-яку точку екстремуму ЦФ X^* називають **локальним екстремумом**, а точку $X^*_{екстр}$, що відповідає найбільшому чи найменшому з локальних екстремумів, – **глобальним екстремумом**.

Наявність аналітичного опису ЦФ дає змогу (*за умови, що вона не менше ніж двічі диференціюється*) провести її дослідження на екстремум за допомогою загальних математичних методів. Так, **необхідною умовою** (*умовою стаціонарності*) існування в точці X^* безумовного локального

екстремуму ЦФ є рівність нулю в цій точці її частинних похідних за усіма керованими параметрами, тобто

$$\nabla F(X^*)=0, \quad \nabla F(X^*)=\left(\frac{\partial F(x_1^*)}{\partial x_1},\frac{\partial F(x_2^*)}{\partial x_2},.....,\frac{\partial F(x_n^*)}{\partial x_n}\right),$$

де $\nabla F(X^*)$ – **градієнт ЦФ** у точці X^* (n – вимірний вектор, компоненти якого рівні частинним похідним ЦФ, які обчислені в точці X^* за усіма керованими параметрами).

Вид екстремуму ЦФ (*min* чи *max*) визначається за результатами дослідження її поведінки в місцевості стаціонарної точки X^*. Для цього формується матриця других похідних ЦФ за усіма керованими параметрами (***матриця Гессе***) і обчислюється її визначник у точці X^*.

$$Ю_{X^*}=\left\{\frac{\partial^2 F(x_1^*)}{\partial x_1^2},\frac{\partial^2 F(x_2^*)}{\partial x_2^2},...\frac{\partial^2 F(x_n^*)}{\partial x_n^2}\right\}.$$

При його *додатному* знаку – у точці X^* спостерігається *мінімум ЦФ*, при *від'ємному – максимум*. В інших випадках точка X^* є *сідловою точкою*.

Сучасні підходи до проведення оптимізаційного проектування ТЗ основані на застосуванні спеціальних пошукових числових методів математичного моделювання. Вони побудовані на використанні при математичному моделюванні одержуваної попередньої інформації для наближення до кінцевого рішення поставленої задачі. Блок-схема узагальненого алгоритму пошуку екстремуму ЦФ, що реалізується в розроблених методах оптимізації, наведена на рисунку 3.3.

Видно, що процес пошуку екстремуму ЦФ базується на проведенні ряду ітераційних циклів – циклів наближення від початкової точки x_0 (*обумовленої відповідними значеннями керованих параметрів),* через деякі проміжні *(варіантні*) точки $x_1,x_2,x_3,.....x_k$ до локального екстремуму x^*. Причому для збіжності процесу пошуку екстремуму повинна забезпечуватися відповідна спрямованість значень $x_1,x_2,x_3,.....x_k$. Наприклад, ***при***

пошуку мінімуму ЦФ повинна виконуватися умова $F_0(x_0) > F_1(x_1) > F_2(x_2) > \ldots\ldots > F_k(x_k)$, а ***при пошуку максимуму*** ЦФ – $F_0(x_0) < F_1(x_1) < F_2(x_2) < \ldots\ldots < F_k(x_k)$. Очевидно також, що задача буде вирішена тим швидше, чим точніше буде здійснено вибір початкової точки пошуку x_0 (*стосовно шуканого екстремуму*).

Аналіз числових методів оптимізації показав, що характерні для них особливості полягають головним чином у проведенні показаних на блок-схемі (*рисунок 3.3*) етапів *2* і *3* – виборі напрямку подальшого пошуку і завданні кроку руху (*координати чергової точки* x_{k+1} *на траєкторії пошуку*).

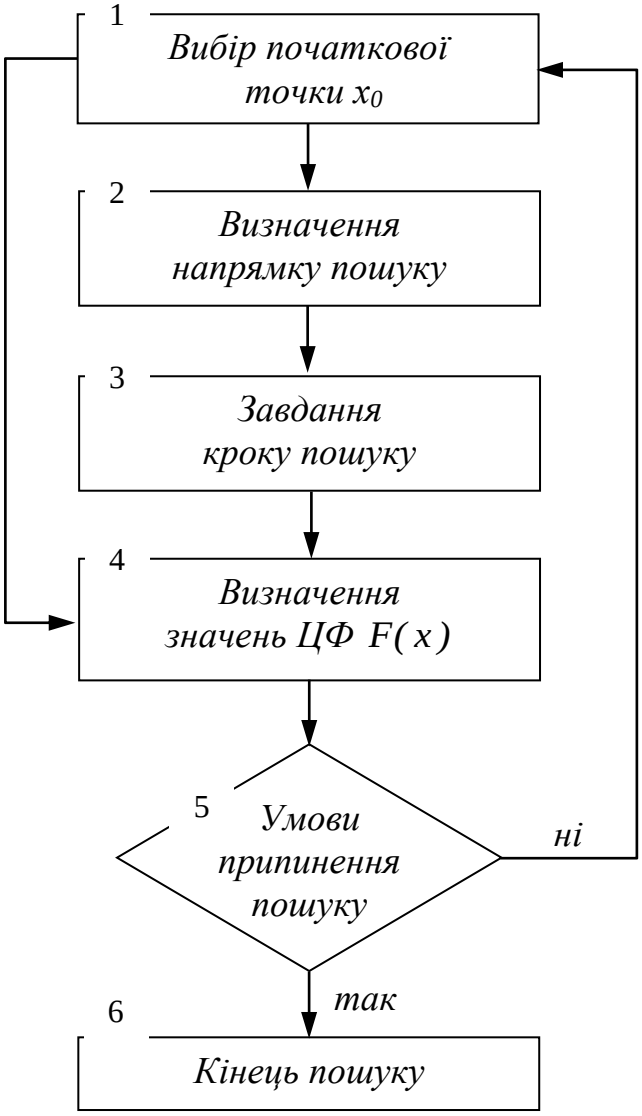


Рисунок 3.3 – Блок-схема узагальненого алгоритму числових методів оптимізації

Найбільше поширення при оптимізаційному проектуванні ТЗ одержали підходи, що передбачають застосування сучасних методів локальної безумовної оптимізації. Залежно від використання значень ЦФ і її похідних за керованими параметрами вони поділяються на **методи нульового, першого і другого порядків (*рівнів*)**.

У **методах нульового порядку** пошук припускає оперування значеннями тільки ЦФ і інформація про її похідні не використовується. Такі методи забезпечують вирішення задач як **одновимірного**, так і **багатовимірного** пошуку екстремуму ЦФ. Методи одновимірного пошуку x^*

базуються на умові (*припущенні*) унімодальності цільової функції $F(x)$ на заданому інтервалі $[a,b]$ при забезпеченні розрахункового визначення величини $F(x)$ для кожного значення $x \in [a,b]$.

У свою чергу методи одновимірного пошуку поділяються на **методи послідовного пошуку** (*методи дихотомії – половинного поділення, Фібоначчі, золотого перерізу*) і **методи, що використовують апроксимацію функції** (*методи квадратичної і кубічної інтерполяції, метод Пиявського та ін.*).

Методи послідовного пошуку – найпростіші. Вони базуються на такій стратегії послідовного пошуку x^*, при якій кожна пара обчислювань $F(x)$ дає змогу звузити область пошуку (*або інтервал невизначеності*). Дійсно, обчислюючи $F(x)$ у таких точках x_1 та x_2, коли забезпечується умова $a < x_1 < x_2 < b$, можна локалізувати інтервал невизначеності шляхом аналізу отриманих значень ЦФ. Наприклад, якщо $F(x_1) < F(x_2)$, то $x^* \in [a,x_2]$; якщо $F(x_1) = F(x_2)$, то $x^* \in [x_1,x_2]$; якщо $F(x_1) > F(x_2)$, то $x^* \in [x_1,b]$.

Стратегія вибору x_1 і x_2 для проведення розрахунків з урахуванням попередніх результатів визначає особливість (*сутність*) різних методів послідовного пошуку.

Серед розглядуваних методів нульового порядку найбільше використання при оптимізаційному проектуванні ТЗ отримали **прямі методи багатовимірного пошуку** екстремуму цільової ЦФ – симплексний метод і його модифікації (*метод деформованого багатогранника Нелдера і Міда*), **метод покоординатного спуску** (*метод Гаусса-Зейделя, Пауелла*).

Більш висока ефективність вирішення задач оптимізаційного проектування ТЗ досягається при використанні **методів оптимізації першого порядку**, які базуються на обчисленні і використанні у процесі пошуку значень ЦФ і її перших похідних. Вони отримали назву градієнтних методів *(методи скорішого спуску, Уілстона-Бокса, спряжених градієнтів, змінної метрики*).

Ці методи базуються на тому, що градієнт $\nabla F(x)$ є ортогональним до гіперповерхні відгуку ЦФ у точці його визначення і його напрямок збігається з локальним напрямком скорішого збільшення ЦФ.

При цьому загальна стратегія пошуку ***максимуму ЦФ*** (*рисунок 3.4*) базується на використанні формули виду

$$x_{k+1} = x_k + h \cdot S_k,$$

де h – величина кроку;

S_k – одиничний вектор напрямку пошуку на k-му кроці;

$$S_k = \frac{\nabla F(x_k)}{\|\nabla F(x_k)\|},$$

де $\|\nabla F(x_k)\|$ – норма вектора градієнта на k-му кроці.

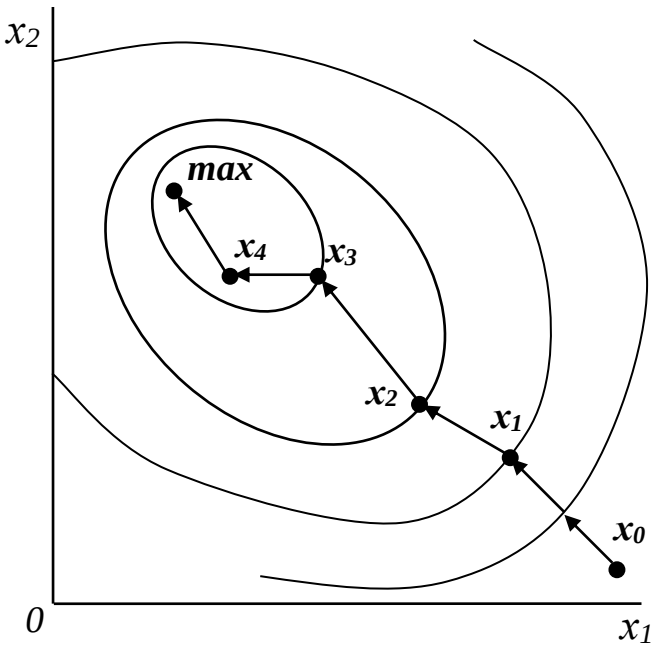


Рисунок 3.4 – Графічна інтерпретація пошуку екстремуму методом спряжених градієнтів

При пошуку мінімуму ЦФ пошук необхідно скеровувати в протилежному градієнту напрямку, а саме:

$$x_{k+1} = x_k - h \cdot S_k, \qquad S_k = -\frac{\nabla F(x_k)}{\|\nabla F(x_k)\|} < 0.$$

Методи оптимізації другого порядку використовують результати обрахувань значень ЦФ, а також її перших і других похідних. Найбільш відомим представником цієї групи є метод Ньютона, у якому необхідна умова існування екстремуму ЦФ – $\nabla F(x) = 0$ розглядається як система алгебраїчних рівнянь, при розв'язанні якої використовується формула Ньютона

$$x_{k+1} = x_k - Ю_k^{-1} \nabla F(x_k),$$

де $Ю_k^{-1}, \nabla F(x_k)$ – відповідно матриця Гессе і градієнт ЦФ, обчислені за всіма керованими параметрами у точці x_k.

За допомогою цієї формули будується послідовність точок $\{x_k\}$, що за визначеними умовами приводить до стаціонарної точки x^*, де $\nabla F(x)=\nabla F(x^*)=0$.

3.3 Оптимізація структури механізмів технічних засобів та приклади їх оптимізаційного проектування

Аналіз конструкцій існуючих ТЗ показує, що й досі питання створення сучасних ТЗ, як правило, розглядаються на основі використання механізмів з традиційною структурою (*загальною будовою*), яка в ряді випадків не є оптимальною. Зрештою це зумовлює підвищення точності і трудомісткості виготовлення деталей, необхідності застосування операцій складання виробів з натягами, погіршення експлуатаційних характеристик ТЗ при деформації ланок, що негативно впливає на працездатність, надійність і довговічність.

У теоретичному плані вказані вище недоліки пов'язані з наявністю і негативним проявом у механізмах так званих **надлишкових зв'язків**, які при традиційному розгляді структури не ураховуються. Тобто вважають, що усі ($S_{заг}$) рівняння зв'язків кінематичних пар (*КП*) є незалежними (*тобто* $S_{заг}=S_{нез}$). Проте для більшості реальних механізмів при виборі неоптимальної структури ця умова не виконується. Це обґрунтовує необхідність урахування надлишкових зв'язків q, кількість яких визначається за формулою $q=S_{заг}-S_{нез}$. У такій постановці задача оптимізації структури механізмів зводиться до пошуку відповідного варіанта структури, при якому забезпечується умова $q=0$. Механізми, для яких виконується ця умова, отримали назву **механізмів з оптимальною структурою** (***раціональних; статично визначених; механізмів, що самовстановлюються***).

Найбільш універсальною є методика визначення та усунення надлишкових зв'язків при виборі структури механізмів, яку запропонував професор Л. М. Решетов. Вона передбачає використання відомих структурних формул О. П. Малишева, О. Г. Озола і Х. І. Гохмана для визначення q і побудови схем (*матриць*) рухомостей у незалежних контурах, що утворюють ланки і КП механізму, для вибору варіанта усунення

надлишкових зв'язків. Структурні формули для визначення q у записі професора Л. М. Решетова наведені нижче.

Формула О. П. Малишева:

$$q = W - 6n + 5p_5 + 4p_4 + 3p_3 + 2p_2 + p_1,$$

де $W = W_{осн} + W_{місц}$ – умовний ступінь рухомості механізму, яка складається з основної рухомості (*відповідає узагальненим координатам*) та місцевих рухомостей ланок;

n – число рухомих ланок у механізмі;

p_5, p_4, p_3, p_2, p_1 – кількість КП (*що утворюють ланки механізму*) відповідно *5, 4, 3, 2* і *1*-го класів.

Структурна формула О. Г. Озола:

$$q = W + 6k - f,$$

де k – кількість незалежних контурів ланок у механізмі (*визначається за формулою Х. І. Гохмана*),

$$k = P_\Sigma - n = p_5 + p_4 + p_3 + p_2 + p_1 - n,$$

де f – загальна рухомість кінематичних пар,

$$f = p_5 + 2p_4 + 3p_3 + 4p_2 + 5p_1.$$

Методика передбачає таку послідовність дій:

1) для розглядуваного механізму визначаються: n, p_5, p_4, p_3, p_2, p_1, W;

2) виконується розрахунок q за формулами О. П. Малишева і О. Г. Озола;

3) будуються схеми (*матриці*) рухомостей у кожному (*відповідно до числа* k) із незалежних контурів ланок. При цьому загальна рухомість розкладається за осями обраної системи координат і розглядається як арифметичний додаток

$$f = f_x + f_y + f_z + \varphi_x + \varphi_y + \varphi_z,$$

де f_x, f_y, f_z – додатки лінійних рухомостей уздовж осей x, y, z;

$\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$ – додатки кутових рухомостей навколо осей x, y, z;

4) виконується аналіз схем рухомостей у кожному з контурів і приймається рішення з усунення надлишкових зв'язків.

Розглянемо використання описаної методики для оптимізації кривошипно-шатунного механізму (*КШМ*), що широко використовується в сучасних теплоенергетичних ТЗ (*двигунах внутрішнього згоряння, компресорах*). Кінематична схема механізму з традиційною структурою показана на рисунку 3.5, *а*.

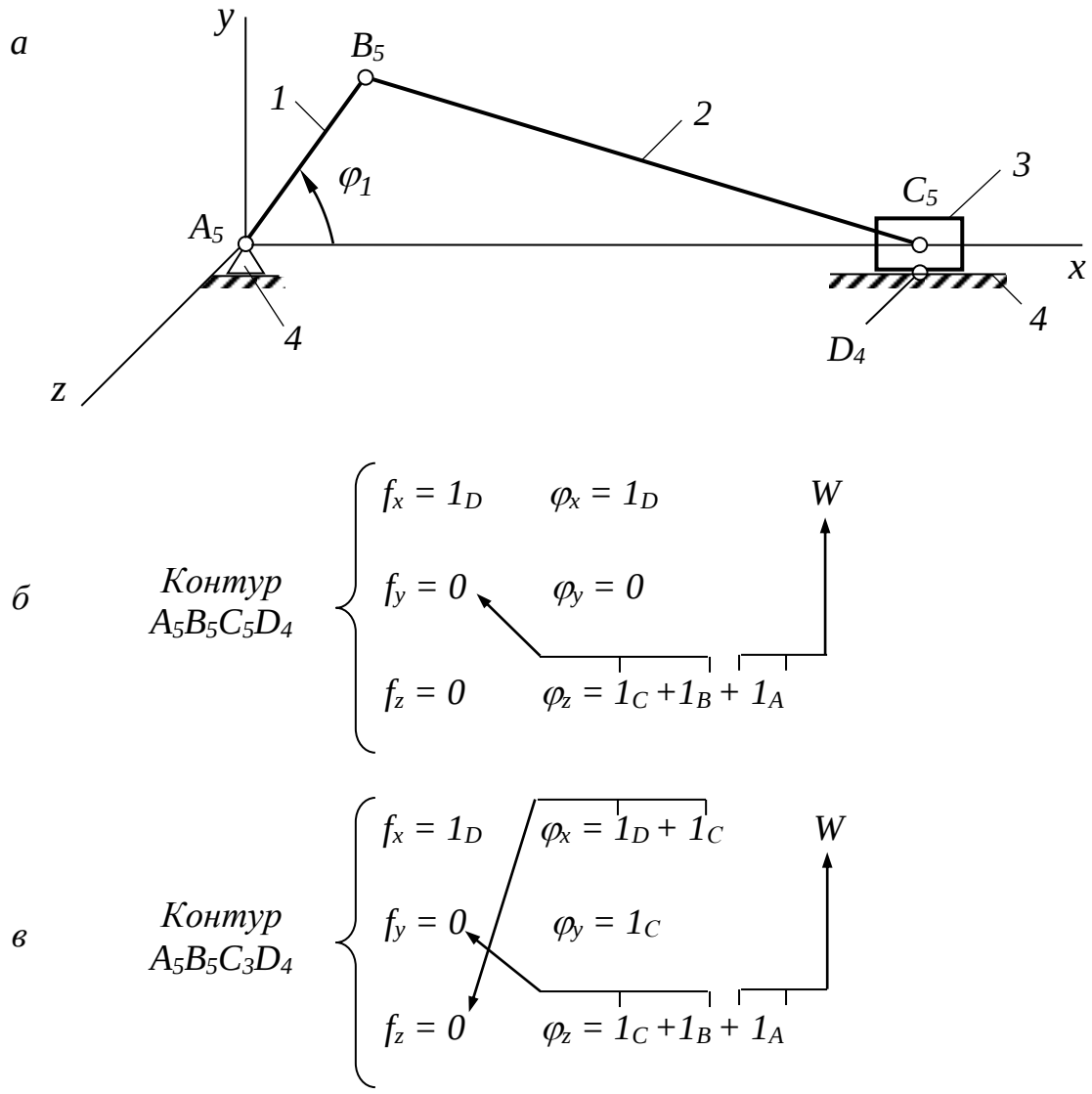
Видно, що механізм має три рухомі ланки – *1, 2, 3* ($n=3$), ступінь рухомості $W=1$ (*визначається узагальненою координатою* φ_1). Його ланки утворюють три обертальні КП п'ятого класу – A_5, B_5, C_5 ($p_5=3$) і одну КП четвертого класу – D_4 ($p_4=1$). Визначення q за формулами О. П. Малишева і О. Г. Озола дало однакові результати – $q=2$, тобто механізм має два надлишкових зв'язки.

За формулою Х. І. Гохмана $k=1$ – ланки утворюють один незалежний контур $A_5\,B_5\,C_5\,D_4$ (*індексами вказані класи КП*). Відповідна схема рухомостей ($f=5$) показана на рисунку 3.5, *б*. Видно, що відсутня лінійна рухомість f_y компенсується двома надлишковими кутовими рухомостями φ_z (що забезпечуються КП C_5 і B_5). Відсутні рухомості f_z і φ_y підтверджують наявність надлишкових зв'язків ($q=2$).

Усунення надлишкових зв'язків відбувається за рахунок збільшення рухомостей КП. У розглядуваному прикладі одним з варіантів такого рішення є заміна КП п'ятого класу, що утворюється ланками 2 і 3 (C_5), на КП третього класу – C_3 (*сферичний шарнір*). Для такого варіанта структури КШМ будемо мати: $n=3$, $W=1$, $p_5=3$, $p_4=1$, $p_3=1$, $k=1$, $f=7$ і $q=0$. Схема рухомостей у контурі $A_5\,B_5\,C_3\,D_4$ показана на рисунку 3.5, *в* і підтверджує відсутність надлишкових зв'язків у КШМ із запропонованим (*оптимальним*) варіантом структури.

Поряд з цим при оптимізаційному проектуванні ТЗ значну роль відіграє оптимізація конструкції відповідних механізмів, агрегатів, складальних одиниць, окремих деталей. Тому нижче

розглянуто елементи оптимізаційного конструювання (*сучасні підходи, поради, конкретні рішення*) та приклади їх практичного використання.



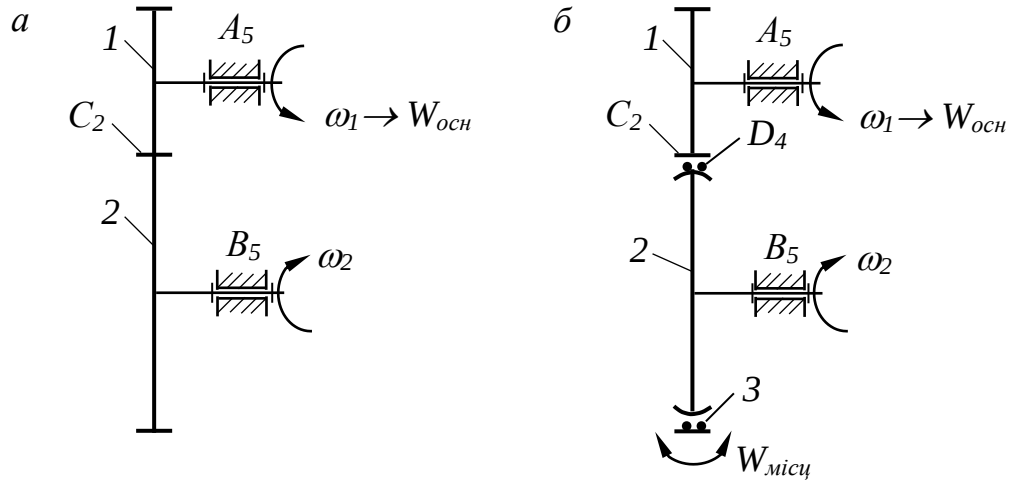
а – традиційна кінематична схема КШМ;
б – схема рухомостей у контурі при традиційній структурі;
в – схема рухомостей у контурі для КШМ з оптимальною структурою

Рисунок 3.5 – До оптимізації структури КШМ

Багаторічний досвід експлуатації і ремонту залізничних локомотивів (*тепловозів, електровозів*) виявив проблеми, пов’язані з досить інтенсивним зношуванням зубчатої передачі

тягового редуктора. Це пояснюється дією динамічних навантажень (*особливо на стиках колії*), які визначають перекіс осей зубчатих коліс, кромковий контакт зубців і їх інтенсивне зношування. Одним з напрямків підвищення довговічності тягового редуктора є **оптимізація конструкції його зубчатих коліс**.

На рисунку 3.6, *а* показана схема тягового редуктора – зубчатої передачі, яка складається з двох зубчатих коліс *1* і *2*, осі яких утворюють з відповідними стояками КП п'ятого класу (A_5, B_5), а зубці – КП другого класу (C_2). Проведені розрахунки з визначення надлишкових зв'язків за наведеними вище формулами виявили їх наявність ($n=2$, $W=W_{осн}=1$, $p_5=2$, $p_2=1$, тоді $q=1$) у структурі зубчатої передачі (*традиційної конструкції*), що теоретично пояснює вказані негативні експлуатаційні прояви.



а – традиційна конструкція, *б* – оптимізована конструкція

Рисунок 3.6 – До оптимізації конструкції тягового редуктора

З метою усунення надлишкового зв'язку і покращання характеристик контакту зубців при русі локомотива може бути запропонована оптимізована конструкція тягового редуктора. Вона передбачає використання замість колеса *2* (*рисунок 3.6, а*) складальної одиниці, що містить ланки *2* і *3* (*рисунок 3.6, б*).

Ланка *3* являє собою колесо, що має зовнішні зубці (*контактують з колесом 1 – КП* C_2) і внутрішні зубці. Ланка 2 є

базовою частиною колеса 2 у традиційній схемі і має зовнішні зубці, які утворюють з'єднання з внутрішніми зубцями колеса *3* типу «зубчатий кардан» (*КП четвертого класу* D_4). Таке з'єднання гарантує передачу крутного моменту від колеса *1* до ланки *2* (*колеса*) і додає місцеву кутову рухомість ланки *3* ($W_{місц}$), що забезпечує нормальне контактування зубців (*у парі* C_2) при перекосі осей коліс *1* і *2*. Перевірка на наявність у оптимізованій конструкції тягового редуктора надлишкових зв'язків ($n=3$, $W=W_{осн}+W_{місц}=2$, $p_5=2$, $p_4=1$, $p_2=1$, тоді $q=0$) підтвердила їх відсутність.

Особливе місце при створенні сучасних ТЗ займає оптимізаційне конструювання різних елементів, які працюють в агресивних середовищах (*елементи конструкції транспортних ТЗ, теплоенергетичних установок, гідравлічні машини та ін.*). Справа у тому, що встановлені за результатами розрахунків на міцність необхідні значення геометричних характеристик перерізів деталей (*площ поперечних перерізів, осьових та полярних моментів опору перерізів*) можуть забезпечуватися шляхом використання різних варіантів їх профілів (*кутиків, таврів, двотаврів, прямокутників, круглих, трубних, їх різних комбінацій*). Але при забезпеченні умов міцності, корозійна стійкість елементів конструкції з різними профілями перерізів буде суттєво відрізнятися.

Розглянемо підходи до **оптимізаційного конструювання за критерієм корозійної стійкості** β. У загальній постановці таке конструювання повинно бути спрямованим на досягнення як можна більших значень β ($\beta \to max$). Для визначення коефіцієнта β при різних конструкційних рішеннях може використовуватися формула

$$\beta = \frac{F}{0{,}383 \cdot П},$$

де F – площа поперечного перерізу (*деталі, елемента конструкції*);

$П$ – зовнішній периметр перерізу, який контактує з середовищем.

Нижче наведені значення коефіцієнта β для елементів конструкції з рівноцінними за міцністю перерізами, які мають різні профілі – з двох кутиків, таврові, прямокутний і трубний (*із закритими торцями*), а також відповідні значення швидкості корозії $V_к$, *мм/рік*, у вологому середовищі.

β	$\rightarrow$	1,5	2,1	3,0	5,0
$V_к$	$\rightarrow$	0,21	0,18	0,13	0,11

Видно, що за критерієм корозійної стійкості при конструюванні ТЗ найбільш доцільно використовувати порожнисті елементи трубного профілю із закритими торцями.

До розглянутого слід додати, що на корозійну стійкість конструкції суттєво впливає якість (*чистота*) контактуючої поверхні. Наприклад, на полірованій поверхні деталі з вуглецевої сталі, яка перебуває у вологій атмосфері, ознаки корозій з'являються на 30-й добі, а на шліфованій – на 10-й добі.

4 ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЕКТУВАННЯ У СУЧАСНИХ СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ (САПР)

4.1 Узагальнена класифікація САПР

Державними стандартами регламентуються всі питання (*визначення, термінологія, структура, класифікація та ін.)*, пов'язані із створенням і використанням сучасних САПР. Відповідно до них **САПР** розглядається як **організаційно-технічна система, яка має комплекс засобів автоматизації проектування , що взаємодіє з відповідними підрозділами проектної організації, колективами фахівців і виконує автоматизоване проектування визначених ТЗ.**

Такі системи створюються в провідних проектних, конструкторських, технологічних та інших організаціях, а також

на підприємствах, де створені відповідні умови (*мають сучасну обчислювальну техніку з розвинутою мережею термінальних пристроїв, каналів передачі інформації; методичне і програмне забезпечення автоматизованого проектування; кваліфіковані кадри*).

Стадії створення САПР регламентуються державними стандартами. За своєю назвою і загальним змістом вони аналогічні до розглянутих раніше стадій створення ТЗ (*передпроектні – розробка ТЗП; розробка і створення технічного пропонування на САПР; ескізний проект; технічний проект; робочий проект; виготовлення, налагодження і випробування; введення в дію*).

Розробка САПР пов'язана з необхідністю задоволення численних вимог. При цьому орієнтуються на виконання таких **основних принципів побудови САПР**:

- **орієнтація на передові досягнення науки, техніки, технологій**. Передбачає високий початковий рівень і безперервний розвиток (*еволюційність*) САПР за рахунок обновлювання методів і технічних засобів проектування, накопичення і використання відповідної інформації;
- **реалізація системного підходу** при автоматизованому проектуванні ТЗ (*розглянуто у розділі 2.1*);
- **адаптивність САПР**. Визначає гнучкість системи, властивості перебудови функціонування залежно від особливостей проектно-конструкторських задач;
- **ергатичність** – раціональний розподіл ролей між людиною та обчислювальною системою в процесі функціонування САПР;
- **максимальне використання уніфікованих компонентів** при розробці САПР (*технічних, методичних, програмних*);
- **живучість** – система повинна бути стійкою (*захищеною*) стосовно випадкових і спрямованих шкідливих проявів або дій.

Основними структурними складовими САПР є проектуючі й обслуговуючі підсистеми. Проектуючі підсистеми (*ППС*) виконують певні проектні процедури та операції (наприклад, підсистеми конструювання різних деталей, збірних одиниць; підсистема технологічного проектування та ін.). **Обслуговуючі підсистеми** (*ОПС*) забезпечують нормальне

функціонування ППС (*наприклад: підсистеми інформаційного пошуку; підсистеми графічного відображення об'єктів проектування; підсистеми документування*).

У свою чергу функціонування ППС і ОПС базується на використанні відповідних **забезпечень (*компонентів*) САПР.** До складу забезпечень САПР входять:

- **технічне забезпечення** – сукупність взаємопов'язаних і взаємодіючих технічних засобів (*ЕОМ, пристрої комп'ютерної та організаційної техніки, засоби інформаційного обміну та ін.*) для автоматизованого проектування;
- **методичне забезпечення.** Здебільшого розглядається як сукупність **математичного** (*методи, алгоритми, моделі ТЗ*) і **лінгвістичного** (*мови проектування, конструювання, термінологія*) забезпечення САПР;
- **програмне забезпечення.** Поєднує всі програми для ЕОМ, необхідні для функціонування підсистем САПР;
- **інформаційне забезпечення** – сукупність усіх необхідних для автоматизованого проектування ТЗ даних на електронних носіях (*опис стандартних проектних процедур, типових елементів конструкції, довідникових даних щодо комплектуючих виробів, конструкційних матеріалів та ін.*);
- **організаційне забезпечення** – комплект документів, що регламентують організаційну структуру підрозділів і правила експлуатації САПР (*положення, інструкції, накази, штатний розклад, кваліфікаційні вимоги та ін.*).

За умов інтенсивного створення САПР для проектування різних об'єктів особливого значення набуває їх класифікація. Державними стандартами передбачена **класифікація САПР на основі виділення відповідних класифікаційних груп**, які встановлені за різними ознаками при використанні фасетного методу класифікації. До **основних класифікаційних груп САПР** належать:

а) **за типом об'єкта проектування**:

1) САПР виробів машинобудування та приладобудування;

2) САПР технологічних процесів у машинобудуванні і приладобудуванні;

3) САПР об'єктів будівництва;

4) САПР організаційних систем;

5) – 9) резервні;

б) **за різновидами об'єкта проектування.** Код і найменування угруповання встановлюються за діючими позначеннями документації на об'єкти, які проектуються САПР;

в) **за складністю об'єкта проектування**, яка оцінюється кількістю складових частин (деталей) об'єкта, що проектується :

1) САПР простих об'єктів (*кількість складових частин* $< 10^2$);

2) САПР об'єктів середньої складності ($10^2....10^3$);

3) САПР складних об'єктів ($10^3....10^4$);

4) САПР дуже складних об'єктів ($10^4....10^6$);

5) САПР об'єктів дуже високого ступеня складності ($> 10^6$);

г) **за рівнем автоматизації проектування**, що оцінюється часткою (у відсотках) автоматизованих робіт від загальної кількості проектних процедур:

1) системи низькоавтоматизованого проектування ($< 25\%$);

2) системи середньоавтоматизованого проектування ($25...50\%$);

3) системи високоавтоматизованого проектування ($> 50\%$);

д) за комплексністю автоматизації проектування:

1) одноетапні САПР;

2) багатоетапні САПР;

3) комплексні (*повноетапні*) САПР;

е) **за характером проектних документів, які випускаються САПР,** – налічує шість угруповань від текстових документів на паперових носіях до усіх видів документів на усіх типах носіїв (від паперових до електронних);

ж) **за кількістю рівнів у структурі технічного забезпечення**:

1) однорівневі САПР (*мають ЕОМ середнього або високого класу із штатним набором периферійних пристроїв з можливостями доповнення засобами обробки графічної інформації*);

2) дворівневі САПР (*мають, в доповнення до однорівневих, одне чи декілька АРМ з міні-ЕОМ*);

3) трирівневі САПР (*мають ЕОМ високого класу, одне чи декілька АРМ і периферійне програмно-керуєме обладнання*);

4) – 9) резервні.

Наведені класифікаційні групи і відповідні угруповання забезпечують класифікацію САПР, які використовуються в різних галузях.

4.2 Комплекс технічних засобів САПР для реалізації автоматизації проектування

Технічне забезпечення систем автоматизованого проектування, як сукупність взаємопов'язаних і взаємодіючих ТЗ, разом з операційними системами ЕОМ утворюють фізичне середовище, в якому реалізуються розглянуті раніше інші види забезпечення САПР. Задачі, пов'язані з програмною обробкою даних, їх підготовкою, введенням, передачею, відображенням і документуванням, архівацією проектних рішень визначають групи необхідних ТЗ, які становлять **комплекс технічних засобів (КТЗ) САПР.**

У КТЗ засоби програмної обробки даних представлені процесорами і запам'ятовувальними пристроями ЕОМ. Загальновідомі засоби підготовки, введення, відображення і документування даних забезпечують взаємодію людини з обчислювальною системою САПР. Засоби архівації проектних рішень представлені зовнішніми запам'ятовувальними пристроями на жорстких та гнучких магнітних носіях. Значне місце в КТЗ займають засоби для передачі даних, які використовуються для забезпечення зв'язків між рознесеними територіально ЕОМ і абонентськими терміналами.

Як правило, технічні засоби САПР використовуються одразу багатьма користувачами і проектними підрозділами, які вирішують різні за складністю проектно-конструкторські задачі і територіально віддалені один від одного. Тому КТЗ сучасних САПР мають ієрархічну структуру, яка включає два, три і, у перспективі, більше рівнів.

На рисунку 4.1 наведена трирівнева структура КТЗ САПР.

На верхньому рівні розміщено **центральний обчислювальний комплекс (ЦОК)** – одна чи декілька ЕОМ великої продуктивності. Він забезпечує рішення найскладніших задач проектування (*з великими витратами машинного часу і*

пам'яті), а також функціонування периферійних програмно-керованих систем (*наприклад інформаційних*).

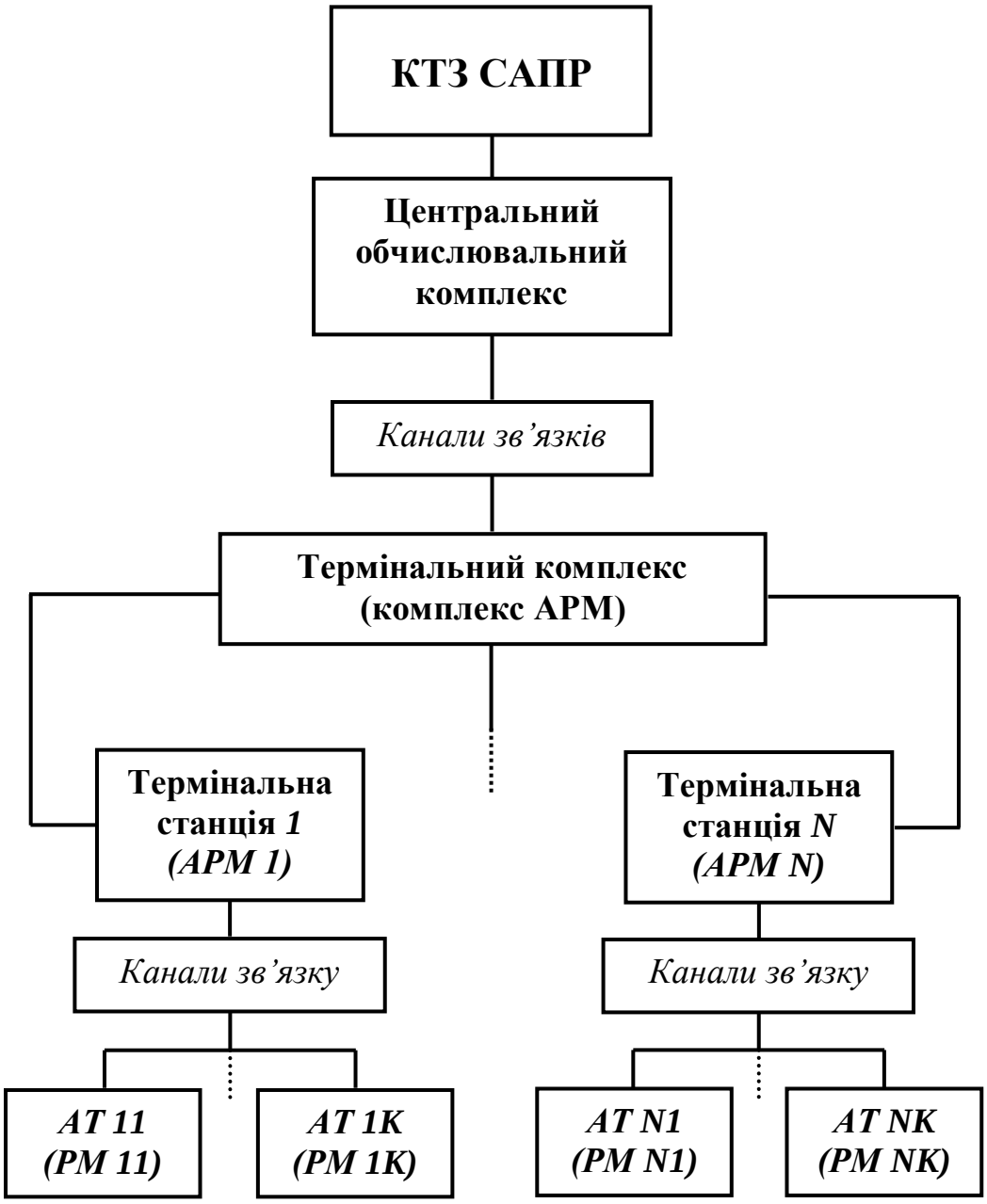


Рисунок 4.1 – Структура КТЗ САПР:
АТ NK (РМ NK) – абонентські термінали (*персональні робочі місця конструкторів*), що функціонують з відповідною термінальною станцією (*АРМ N*)

На другому (*середньому*) рівні фігурує **термінальний комплекс**, що об'єднує декілька **термінальних станцій** (*автоматизованих робочих місць (АРМ)*), до складу яких входять ЕОМ середньої продуктивності з відповідним набором

периферійних пристроїв. Вони забезпечують рішення більшості проектно-конструкторських задач.

Третій рівень становлять **абонентські термінали** або **персональні робочі міста конструкторів**. До їх складу входять міні-ЕОМ із штатним набором пристроїв, що забезпечують взаємодію конструктора з обчислювальною системою.

Видно, що КТЗ САПР об'єднує різноманітні ЕОМ – від міні- до супер-ЕОМ. Можливість використання різних ЕОМ у складі КТЗ оцінюється за сукупністю багатьох показників, головними з яких є технічні, а також вартість придбання й експлуатації. При цьому як основні технічні показники ЕОМ розглядаються продуктивність, місткість оперативного запам'ятовувального пристрою (*ОЗП*), пропускна спроможність системи, підсистеми введення-виведення інформації, надійність функціонування та ін.

До основних технічних показників ЕОМ відносять:

1) продуктивність, яка переважно визначається її швидкодією, що вимірюється кількістю здійснених операцій за одиницю часу (*операцій за секунду*). Вже зараз потрібна продуктивність обчислювальної системи САПР може бути повністю забезпечена на основі використання сучасних ЕОМ високого класу (*швидкодія > 100 млн.оп/с*), а також міні-ЕОМ і ЕОМ середнього класу (*мільйони і десятки млн.оп/с*);

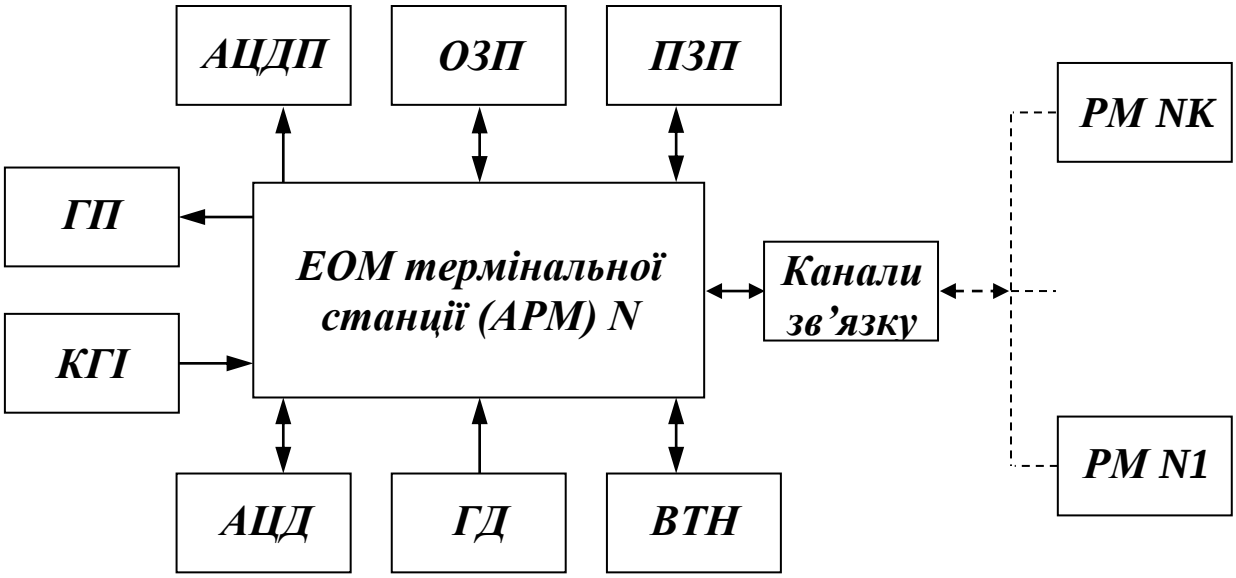
2) місткість оперативного запам'ятовувального пристрою (ОЗП), який визначає можливості ЕОМ з виконання складних програм з обробкою великих обсягів інформації. Місткість ОЗП оцінюється в байтах, кілобайтах (*1 Кбайт=1024 байт*), мегабайтах (*1Мбайт=1024 Кбайт*) і гігабайтах (*1Гбайт=1024 Мбайт*);

3) наявність пристроїв зовнішньої пам'яті (ПЗП), які повинні забезпечувати прямий і послідовний доступ до накопичувачів (*зовнішніх жорстких дисків та твердотілих SSD*); надійну обробку інформації та інформаційний обмін; захист інформації від сторонніх. Сучасні ПЗП дають змогу зберігати тисячі гігабайтів інформації;

4) надійність функціонування ЕОМ визначається показниками, які мають імовірний характер. До основних з них належать: імовірність без відмовної роботи ЕОМ протягом визначеного інтервалу часу; середній час $T_Б$ безвідмовної роботи

ЕОМ (*напрацювання на відмову*); середній час T_B відновлення працездатності ЕОМ; коефіцієнт готовності ЕОМ $K_Г = T_Б /(T_Б + T_B)$.

Як показано раніше (*рисунок 4.1*), основу другого рівня КТЗ сучасних САПР становлять термінальні станції (*АРМ*) (*рисунок 4.2*), а третього – персональні робочі місця конструкторів (*РМ*). Для введення в ЕОМ текстової інформації, оперативного перегляду, а також документування результатів проектування використовуються АЦД і АЦДП. Для обміну графічною інформацією (*креслення, схеми, графіки*) використовуються: ГД (*оперативне введення і редагування*); КГІ (*безпосереднє перетворення графічної інформації в цифрову форму, яка вводиться в ЕОМ*); ГП або автомат креслення (*перетворення цифрової інформації ЕОМ у відповідне графічне відображення на паперовому чи інших носіях*). Для обміну, зберігання і накопичення інформації використовуються ВТН, ОЗП, ПЗП.



АЦД – алфавітно-цифровий дисплей; ГД – графічний дисплей;
ВТН – вінчестер або твердотільний накопичувач;
АЦДП – алфавітно-цифровий друкувальний пристрій;
ОЗП – оперативний запам'ятовувальний пристрій;
ПЗП – пристрій зовнішньої пам'яті; ГП – графопобудовник;
КГІ – кодувальник графічної інформації

Рисунок 4.2 – Структура технічних засобів термінальної станції САПР

Наведені на рисунках 4.1, 4.2 структурні схеми КТЗ обумовлюють необхідність розглядання САПР як багатопроцесорних і багатомашинних **обчислювальних мереж** (*ОМ*). Під **обчислювальною мережею САПР** (*мережею ЕОМ*) розуміють об'єднання за допомогою спеціальних каналів зв'язку достатньо великої кількості незалежних ОМ з метою найбільш ефективного використання апаратних, програмних і інформаційних ресурсів.

В обчислювальних мережах САПР відстані між окремими вузлами (*відповідними ЕОМ*) можуть бути малими (*від метрів до декількох кілометрів*) і великими (*від десятків до тисяч кілометрів*), коли створюються ОМ з потужним ЦОК великих фірм, об'єднуються відповідні ЦОК, розташовані в різних географічних регіонах. Залежно від цього вони поділяються на **локальні обчислювальні мережі** (*ЛОМ*) і **глобальні обчислювальні мережі** (*ГОМ*).

Слід зазначити, що класифікація ОМ САПР виконується за багатьма ознаками. Наприклад, за типом ЕОМ вони поділяються на **однорідні** (*об'єднують програмносумісні ЕОМ*) і **неоднорідні** ОМ. Залежно від розподілення функції керування мережею – **централізовані** (*керування центральною ЕОМ*) і **децентралізовані** ОМ. Використовуються також класифікаційні ознаки ОМ за **пропускною спроможністю каналів передачі даних** і **принципом передачі даних між вузлами мережі.**

Значний вплив на характеристики функціонування САПР має структура (*архітектура, конфігурація*) ОМ. При описі різних структур ОМ САПР використовуються поняття центрального вузла (**ЦВ**) і вузлів (**В**). Для ЛОМ у ролі **ЦВ** розглядають термінальну станцію (*відповідну ЕОМ*), у ролі **В** – персональні робочі місця конструкторів (*термінальні ЕОМ*). Для опису ГОМ доцільно використовувати поняття **ГЦВ** – головного центрального вузла (ЦОК), **ЦВ** (*термінальні станції*) і **В** (*абонентські термінали*).

На рисунку 4.3 показана архітектура ГОМ, яка відповідає наведеній на рисунку 4.1 структурі КТЗ трирівневої САПР і має назву ієрархічної. У такій мережі загальні можливості обчислювальної системи збільшуються від нижніх до верхніх рівнів (*від ЕОМ вузлів, до ЕОМ ЦВ і далі, до ЦОК*).

Одну з основних ролей при функціонуванні САПР відіграють ЛОМ, які повинні забезпечувати: потрібну продуктивність і економічність обробки даних; підвищену надійність і живучість; можливість подальшого розвитку мережі; бути відносно простими і доступними за ціною. Повнота виконання цих вимог значною мірою залежить від структури ЛОМ, можливі варіанти якої розглянуто нижче.

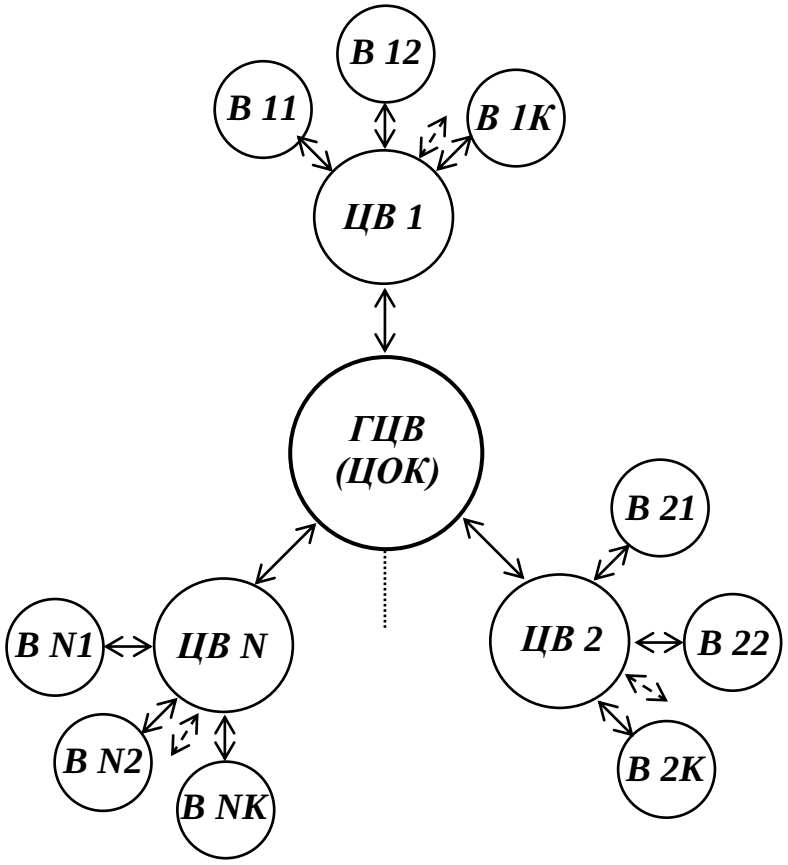
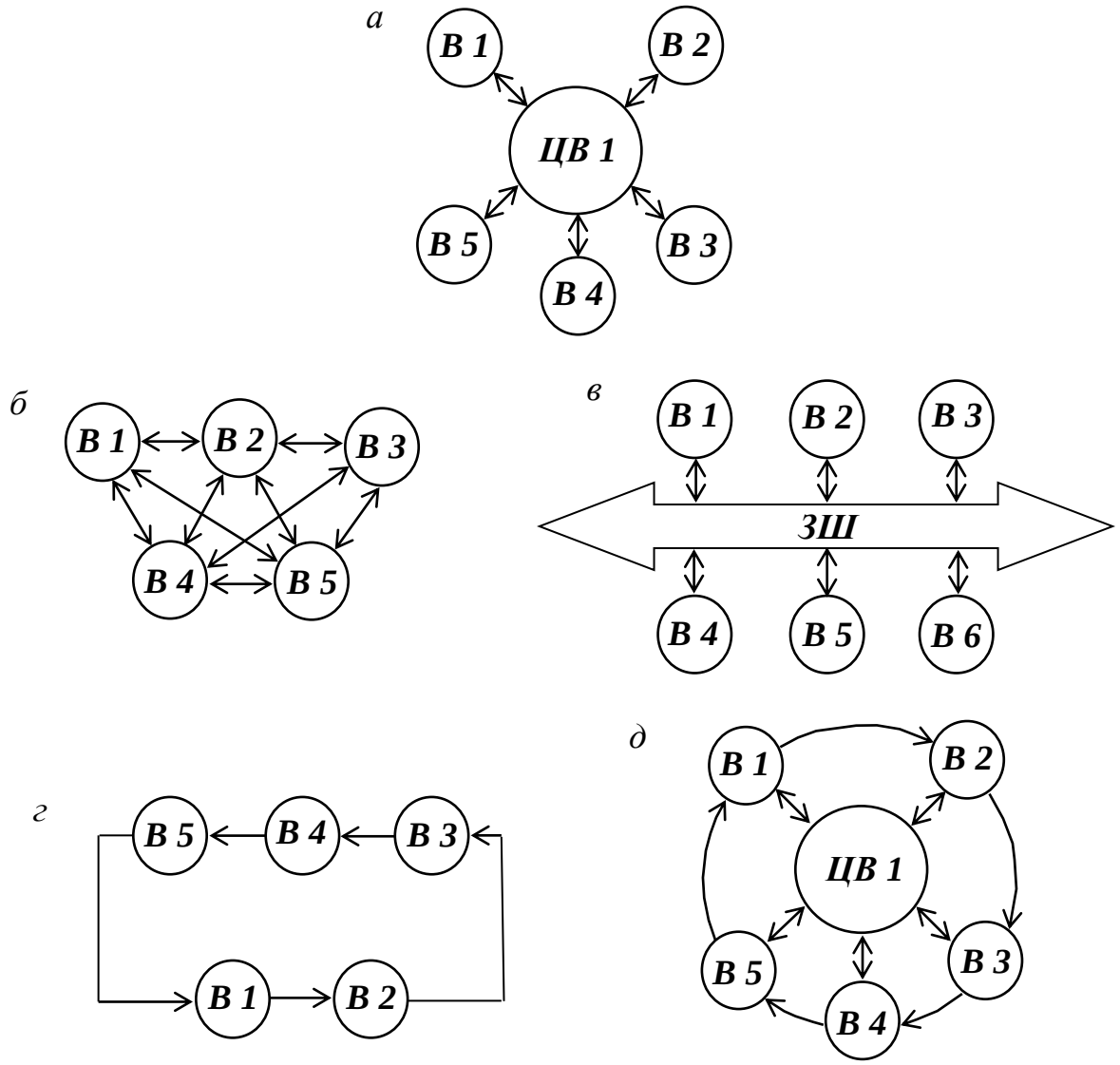


Рисунок 4.3 – Ієрархічна структура ГОМ САПР

На рисунку 4.4, *а* показана **радіальна структура** (*структура типу «зірка»*), у якій **ЦВ** здійснює комутацію двоспрямованих каналів зв'язку з кожним з, наприклад, п'яти вузлів (*ЕОМ абонентських терміналів*). Електронно-обчислювальна машина **ЦВ** здійснює обробку відповідних даних і їх передачу системі. Тому її потужність повинна бути достатньою для обробки великих обсягів інформації. У такій структурі надійність **ЦВ** визначає надійність усієї ЛОМ САПР.



а – радіальна; *б* – типу «кожний вузол з кожним»;
в – магістрального типу; *г* – кільцева; *д* – радіально-кільцева

Рисунок 4.4 – Структура обчислювальних мереж САПР

Відносно простою, більш надійною, але й дорожчою є показана на рисунку 4.4, *б* структура типу **«кожний вузол з кожним»**. При такій структурі збільшення кількості вузлів у мережі визначає зростання кількості і довжини ліній зв'язку. Тому у ряді випадків доцільно використовувати можливості структури ЛОМ **магістрального (шинного) типу** (рисунок 4.4, *в*), яка дає змогу використовувати один загальний канал зв'язку (*загальну шину (ЗШ)*) для декількох ЕОМ вузлів.

Найбільше розповсюдження в САПР отримали ЛОМ з **кільцевою (петльовою) структурою** (рисунок 4.4, *г*). У їх основу покладено використання каналу зв'язку, який утворює

замкнене кільце (*чи петлю*). Підключення вузлів (*відповідних ЕОМ*) здійснюється за допомогою активних елементів, які входять до складу мережі і транслюють циркулюючі в ній повідомлення.

Слід зазначити, що в деяких випадках з метою поліпшення відповідних характеристик (наприклад, надійності, продуктивності та ін.) використовують ЛОМ з комбінованою структурою. Найчастіше це ЛОМ з **радіально-кільцевою структурою**, яка показана на рисунку 4.4, *д*.

Функціонування обчислювальних мереж САПР за обраним варіантом структури забезпечується **апаратними засобами ОМ**. До їх складу входять такі групи ТЗ: ЕОМ вузлів мережі; пристрої спряження ЕОМ з апаратурою для передачі даних (*АПД*) по лініях зв'язку; АПД і фізичні канали зв'язку, які використовуються для передачі даних. Усі групи ТЗ з'єднуються за допомогою відповідних стандартних **інтерфейсів** (*правил і засобів спряження пристроїв складної обчислювальної системи*).

У ЛОМ для фізичної реалізації послідовної передачі даних використовують дві групи ТЗ. До першої групи відносять **канали зв'язку**, які конструктивно можуть виконуватися у вигляді одиночного провідника, звитої пари проводів, високочастотного коаксіального або волоконно-оптичного кабелю.

Другу групу становлять **мережеві контролери** або **мережеві інтерфейсні модулі** різних пристроїв, що підключаються до ЛОМ. Мережеві контролери виконують функції пристроїв спряження і АПД (*здійснюють перетворення інформації, керування обміном, контроль і діагностування пристроїв для обміну*), конструктивно виготовляються на базі мікропроцесорів або спеціальних великих інтегральних схем.

4.3 Особливості методичного, програмного та інформаційного забезпечень сучасних САПР

Проведення автоматизованого проектування технічних засобів за допомогою розглянутого раніше КТЗ САПР потребує відповідного методичного, програмного й інформаційного забезпечень, найважливіші особливості яких розглянуто нижче.

Основними складовими методичного забезпечення САПР є **математичне** і **лінгвістичне** забезпечення.

До **математичного забезпечення (*МЗ*)** належать усі математичні моделі, методи й алгоритми виконання проектних процедур та керування процесами проектування, які використовуються в ППС і ОПС САПР. Воно є математичною базою для опису задач автоматизованого проектування, організації обчислювального процесу, виконання проектних процедур і операцій, забезпечення діалогових режимів взаємодії конструктора з ЕОМ, оформлення конструкторської документації та ін. При цьому елементи МЗ дуже різноманітні й укрупнено поділяються на **інваріантні** і **спеціальні.**

До **інваріантних елементів** МЗ, які широко використовуються в різних САПР, належать: принципи і методи побудови функціональних і структурних ММ, методи числового розв'язання алгебраїчних і диференціальних рівнянь, методи пошуку екстремуму та ін.

Спеціальні елементи МЗ ураховують специфіку ТЗ, що проектуються. До них належать численні ФММ і СММ, методи, методики й алгоритми, які використовуються при конструюванні ТЗ.

Основу МЗ конструювання ТЗ становлять ММ для проведення **топологічного** і **геометричного конструювання.** У проектних процедурах **топологічного конструювання** ТЗ використовуються ММ для вирішення задач компонування різних модулів конструкції, що належать до вищого ієрархічного рівня з елементів (*збірних одиниць, деталей*) нижчого ієрархічного рівня.

У проектних процедурах **геометричного конструювання** ТЗ використовують ММ, які забезпечують автоматизоване конструювання складних за геометричними формами об'єктів; отримання оптимальної за різними критеріями функціонування конфігурації деталей, агрегатів, ТЗ у цілому (*корпуси тепловозів, літаків, легковиків та ін.*); оформлення конструкторської текстової і графічної документації.

Слід зазначити, що незважаючи на різноманіття елементів і форм МЗ його практичне використання здійснюється за допомогою лінгвістичного і програмного забезпечень САПР.

Лінгвістичним забезпеченням (*ЛЗ*) у САПР є сукупність мов, які використовуються для опису різних процедур автоматизованого проектування і проектних рішень, забезпечують переведення МЗ у відповідне програмне забезпечення, що сприймається ЕОМ, а також діалогові режими спілкування конструкторів з обчислювальною системою. Складові ЛЗ САПР поділяються на дві групи – **мови програмування** і **мови проектування-конструювання**.

Мови програмування (*МП*) застосовуються для написання основного програмного забезпечення й умовно належать до лінгвістичних засобів розробників САПР. Узагальненими вимогами, яким повинні задовольняти МП, є: **зручність використання** (*простота засвоєння, малі витрати часу на написання програм*); **універсальність** (*можливості мови з опису різних алгоритмів для програмного забезпечення САПР*); **висока ефективність об'єктних програм** (*перетворювання програм транслятором з МП на машинні мови, витрати часу і пам'яті на їх виконання*).

Вимогам універсальності й ефективності об'єктних програм найкраще відповідають **машинно-орієнтовані мови** (*мови асемблера або автокоди*), при використанні яких забезпечується відносна простота і висока ефективність функціонування трансляторів програм (*асемблерів*) на машинну мову.

Широке розповсюдження як МП САПР отримали алгоритмічні мови ФОРТРАН (*а також її спрощені варіанти БЕЙСІК*), ПЛ/1, ПАСКАЛЬ.

Найбільше наближення до мов асемблера за універсальністю та ефективністю об'єктних програм забезпечується при використанні як МП САПР алгоритмічних мов високого рівня АДА і СІ з розвинутими можливостями опису проектних процедур.

Другу групу складових ЛЗ, яка умовно належить до засобів користувачів САПР для опису об'єктів і задач проектування, представляють **мови проектування-конструювання (МПК)**. Серед них виділяються такі мови: **вхідні**, **вихідні**, **супроводження**, **керування**, **проміжні** і **внутрішні**.

Вхідні мови використовуються для задання відправної інформації про об'єкти (***мови опису об'єктів***) і задачі проектування-конструювання (***мови опису завдань***). У свою чергу мови опису об'єктів об'єднують **мови схемні** (*опис електричних схем*

мікропроцесорних пристроїв), **графічні** (*опис об'єктів графічного моделювання в підсистемах машинної графіки*), **моделювання** (*опис об'єктів моделювання в системах масового обслуговування*).

Вихідні мови використовуються для висвітлення результатів виконання проектних процедур обчислювальною системою САПР. **Мови супроводження** використовуються для коректування і редагування даних при виконанні проектних процедур. **Мови керування** забезпечують подання керуючої інформації для програмно-керованого виконавчого обладнання КТЗ САПР. **Проміжні та внутрішні мови** забезпечують подання інформації на визначених стадіях її переробки в ЕОМ.

Слід зазначити, що на відміну від інших МПК **вхідні мови** характеризуються великим різноманіттям, вузькою проблемною орієнтацією та малою гнучкістю при адаптації САПР до відповідних умов. У зв'язку з цим у сучасних САПР використовується **дворівневе лінгвістичне забезпечення** формування вхідних завдань для вирішення проектно-конструкторських задач, принципова схема якого показана на рисунку 4.5.

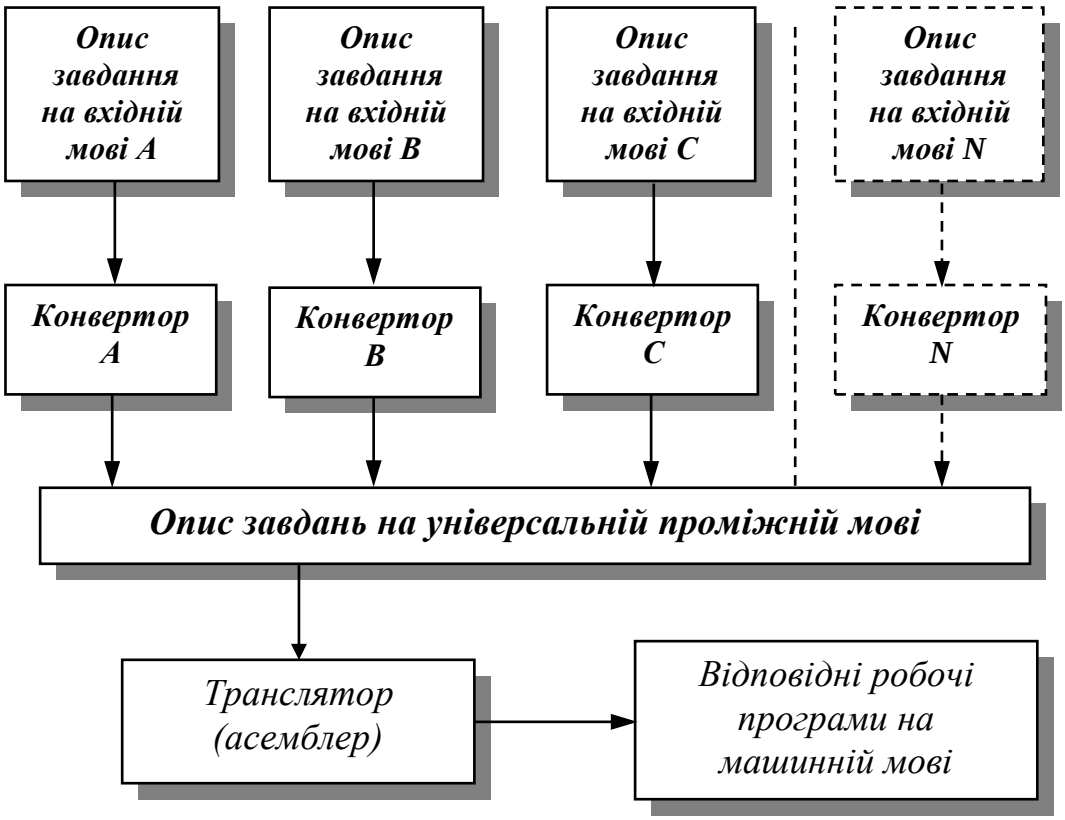


Рисунок 4.5 – Схема дворівневого лінгвістичного забезпечення САПР

Його особливістю є використання вузькоспеціалізованих, до визначених об'єктів, вхідних мов *A, B, C ...N* і універсальної проміжної мови, яка ураховує особливості широкого класу об'єктів (*усіх, що описуються вхідними мовами A, B, C ...N*). При цьому конструктор складає описи різних об'єктів (*завдань на проектування*) на відповідних вхідних мовах, які за допомогою спеціалізованих програм (***конверторів** A, B, C ...N*) переводяться на універсальну проміжну мову і передаються на основний мовний транслятор ЕОМ, який перетворює описи завдань з проміжної мови у відповідні робочі програми на машинній мові.

Додатково МПК поділяються на **процедурні** та **непроцедурні мови**. Процедурні МПК близькі до мов опису алгоритмів і використовуються для опису процесів, які мають розвиток у часі (*завдання й алгоритми для моделювання технічних систем на метарівні*). Непроцедурні МПК застосовуються для опису структури об'єктів, що проектуються.

Програмне забезпечення (*ПЗ*) САПР об'єднує всі програми, необхідні для функціонування ППС і ОПС у процесі автоматизованого проектування ТЗ. Укрупнено воно поділяється на **загальносистемне, базове** (*здебільшого належить до ПЗ ОПС*) і **прикладне** (*спеціальне ПЗ ППС*).

Загальносистемне ПЗ призначене для організації функціонування КТЗ, планування і керування обчислювальним процесом, розподілу відповідних ресурсів і представлене операційними системами ЕОМ САПР. **Базове ПЗ** забезпечує правильне функціонування програм, що входять до складу прикладного ПЗ ППС. Здебільшого його основу становлять **пакети прикладних програм** (*ППП*), що централізовано постачаються разом з елементами КТЗ САПР і призначені для використання на основних маршрутах проектування. **Прикладне ПЗ** становлять програми, за допомогою яких реалізується в ППС математичне забезпечення для безпосереднього використання проектних процедур. Відповідні ППП обслуговують визначені етапи проектування або групи однотипних задач у межах різних етапів (*маршрутів*) проектування. У свою чергу ППП можуть мати досить складну структуру, де виділяється **керуюча** та **обробляюча** частини. До **керуючої** частини ППП відносять **монітор** (*керуючу програму*) пакета, який функціонує під

керуванням моніторної системи САПР. **Обробляючу** частину ППП становлять відповідні програми, які забезпечують формування робочих програм для виконання проектних операцій і процедур на визначених маршрутах проектування.

Загальна структура й особливості ПЗ САПР визначаються багатьма факторами, до головних з яких належать: архітектура і склад КТЗ; тип і блочно-ієрархічний опис ТЗ, що проектується; ступінь автоматизації виконання окремих проектних процедур; режими і засоби взаємодії конструктора з обчислювальною системою та ін. Розглянемо складові ПЗ однорівневої (*найпростішої*) САПР, укрупнена структура якої показана на рисунку 4.6.

Видно, що ПЗ ППС САПР об'єднує програмні забезпечення всіх проектуючих підсистем (*ППС 1, ..., ППС N*), які містять відповідні ППП для математичного моделювання, рішення проектно-конструкторських задач на різних ієрархічних рівнях (*від початкових проектних процедур – до заключних маршрутів конструювання*). Програмне забезпечення ОПС САПР містить програмні забезпечення діалогової підсистеми (*ДП*), системи керування базами даних (*СКБД*) та інструментальної підсистеми програмування (*ІПП*).

Програмне забезпечення ДП обслуговує різні форми (*пасивні, активні*) діалогових режимів роботи конструктора з обчислювальною системою САПР. При його створенні використовується ЛЗ діалогових режимів, яке представлено відповідними діалоговими мовами. **Програмне забезпечення СКБД** об'єднує програмні засоби для формування і поновлення необхідних для автоматизованого проектування ТЗ баз даних, знаходження в них необхідної інформації згідно із запитами обчислювальної системи або користувачів САПР, захист баз даних від несанкціонованих втручань та ін. **Програмне забезпечення ІПП** базується на комплексному ППП (*генераторі прикладних програм*), який забезпечує синтезування потрібних для вирішення відповідних проектно-конструкторських задач нових програм з уніфікованих модулів (*наприклад, диференціювання, інтегрування, математичного планування та ін.*).

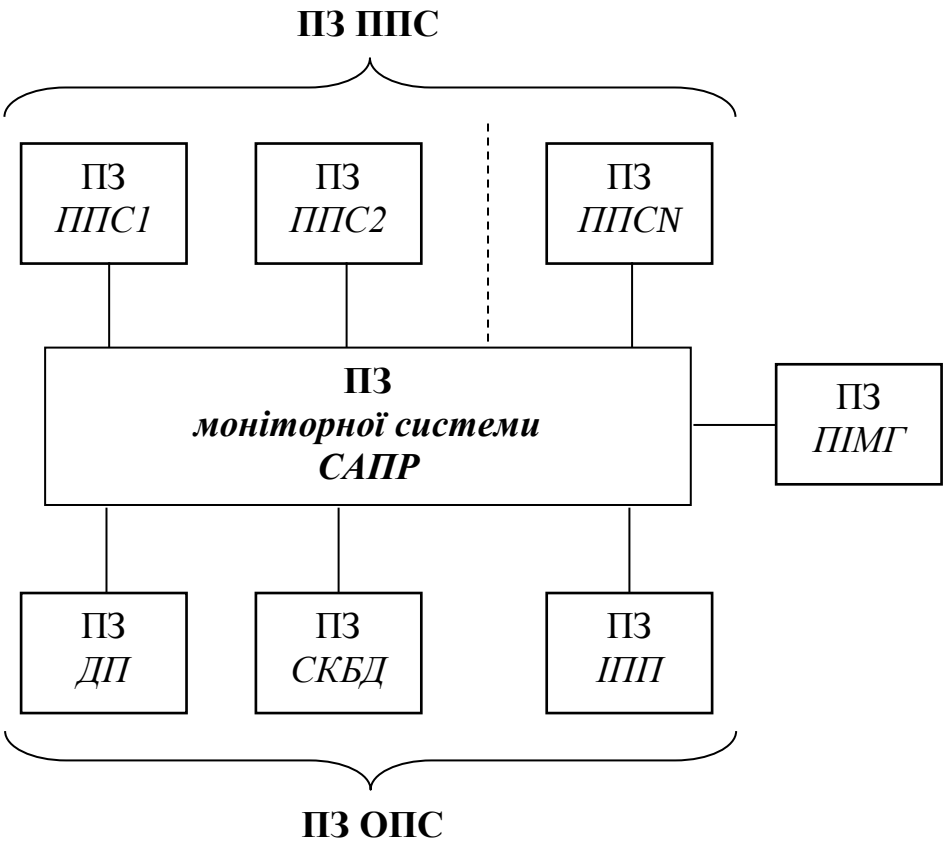


Рисунок 4.6 – Укрупнена структура програмного забезпечення одноріневої САПР
(програмні забезпечення: *ППС1, 2, …N* – відповідних проектуючих підсистем; *ДП* – діалогової підсистеми; *СКБД* – системи керування базами даних; *ІПП* – інструментальної підсистеми програмування; *ПІМГ* – підсистеми інтерактивної машинної графіки)

Одну з основних ролей при функціонуванні САПР відіграє **ПЗ моніторної системи**. Його становлять **пакети моніторних (керуючих) програм**, які забезпечують: приймання і правильну інтерпретацію команд проектувальника; завантаження потрібного ПЗ для формування і виконання відповідних маршрутів проектування; організацію ефективної взаємодії між різними ППС і ОПС; динамічне розширення пам'яті обчислювальної системи; різноманітні сервісні функції (*наприклад, реєстрація користувачів, ведення служби часу, збирання статистичної інформації та ін.*).

Особливе місце у ПЗ САПР належить ПЗ **підсистеми інтерактивної машинної графіки (*ПІМГ*)**. Відповідні ППП

входять до складу проектуючих (*етапи функціонального проектування і конструювання ТЗ*) і обслуговуючих підсистем (*наочне подання вхідної і вихідної інформації, оформлення креслень деталей, вузлів та ін.*) і забезпечують автоматизоване проведення графічно-креслярських робіт, частка яких залежно від складності конструкції ТЗ становить від *30* до *80 %* загального обсягу проектування.

Для виконання **процедур машинної графіки** в ПЗ ПІМГ САПР використовуються відповідні ППП (*наприклад, ГРАФОР, ГРАФАЛ, ФАП КФ та ін.*), які розробляються за допомогою різних графічних мов (*ГРАФІК, ГЕОМАЛ, АППАРАТ, ІРІС та ін.*). Сукупність графічної мови і відповідного пакета графічних програм називають **системою геометричного моделювання** (*наприклад, системи ОГРА, КОМПАС, AutoCAD, SolidWORKS*).

Однією з найскладніших проблемних задач, які вирішуються при створенні САПР, є формування **інформаційного забезпечення (*ІЗ*)**, яке в цілому об'єднує всі необхідні для автоматизованого проектування дані. Вони можуть бути подані на різних носіях у вигляді тих чи інших документів, у яких містяться відомості довідкового характеру про конструкційні матеріали, комплектуючі вироби, типові проектні рішення, параметри різних структур і елементів ТЗ, відомості про стан поточних розробок у вигляді проміжних і кінцевих проектних рішень та ін. Головною складовою ІЗ є **банк даних (*БНД*)**, який являє собою сукупність засобів для централізованого накопичування і колективного використання всіх необхідних даних у САПР. Банк даних складається з численних різноманітних **баз даних (*БД*)** і СКБД. Бази даних містять відповідні дані, які структуровані за прийнятими в БНД правилами і містяться у запам'ятовувальних пристроях КТЗ САПР. Поновлення БД і використання БНД у процесі автоматизованого проектування забезпечує СКБД.

Інформаційне забезпечення САПР повинно повною мірою відповідати вимогам з боку ПЗ в процесі автоматизованого виконання маршрутів проектування з великою кількістю взаємодіючих програмних модулів. Необхідна взаємодія програмних модулів забезпечується відповідними **зв'язками за керуванням** і **зв'язками за інформацією**. При цьому **зв'язки за**

керуванням забезпечуються моніторною системою і виражаються в упорядкованих переходах від виконання одного програмного модуля – до виконання іншого, з одного маршруту проектування – на другий. **Зв'язки за інформацією** виражаються в забезпеченні використання необхідних даних у різних модулях одного або декількох маршрутів проектування.

Проблеми інформаційного узгодження різних частин ПЗ при реалізації багатьох можливих маршрутів проектування ТЗ передбачають використання таких способів організації зв'язків за інформацією на основі: передачі даних із викликаючої програми в підпрограму, що викликається; утворення загальних областей (*зон обміну*) взаємодіючих модулів; використання БНД і СКБД.

Реалізація інформаційних зв'язків способом **передачі даних з викликаючої програми в підпрограму, що викликається,** можлива при відносно малих обсягах і простій структурі інформації (*передача значень параметрів або їх адрес у межах окремих програмних модулів*). У випадках, коли в будь-якому наступному модулі маршруту необхідно використовувати ту чи іншу частину отриманих у попередніх модулях даних, реалізуються інформаційні зв'язки **на основі утворення відповідних зон обміну**. Кожен модуль маршруту проектування спрямовує отримані в ньому дані в зони обміну, орієнтовані на відповідні програмні модулі. При цьому форма подання даних повинна задовольняти вимоги до їх використання у кожному з модулів-споживачів. З урахуванням різних вимог до структури даних у кожному модулі-споживачі такий спосіб доцільно використовувати в межах окремих маршрутів проектування при відносно малій і стабільній кількості інформаційних зв'язків.

В умовах функціонування САПР, коли значна кількість одних і тих самих програмних модулів входить у різні маршрути проектування і взаємодіє з іншими модулями, найбільш універсальним є спосіб реалізації інформаційних зв'язків **на основі використання БНД і СКБД**. Головна особливість зосередженої в БНД (*його БД*) інформації полягає в її структурованості і відомості про структуру і взаємозв'язки даних у кожній БД, їх упорядковане розміщення, використання допоміжних оболонок і масивів (*фреймові оболонки, масиви покажчиків, індексів, імен та ін.*) забезпечують накопичення,

збереження і надання інформації в процесі автоматизованого проектування ТЗ. Це дає змогу розробити уніфіковані алгоритми для СКБД, яка забезпечує інформаційний обмін між БД і будь-яким програмним модулем САПР.

Слід зазначити, що реалізація інформаційних зв'язків з використанням БНД і СКБД забезпечує якісний автоматизований обмін інформаційними потоками між різними ППП і підсистемами САПР, що є однією з необхідних умов побудови інтегральних САПР.

4.4 Режими взаємодії конструктора з обчислювальною системою при автоматизації проектування

Значну роль у досягненні високих показників автоматизованого проектування ТЗ відіграє раціональна взаємодія конструктора з обчислювальною системою САПР.

Обчислювальна система (ОБС) являє собою об'єднання **апаратних засобів ЕОМ** з **програмним забезпеченням САПР**, розподілення функцій між якими виконується за умов досягнення високої продуктивності ОБС і зниження її вартості.

Апаратні засоби ОБС поділяються на дві групи: **центральні і периферійні пристрої**. До центральних належать пристрої, які безпосередньо здійснюють обробку даних (*центральний процесор, ОЗП, процесори-канали введення – виведення для обміну інформацією між ОЗП і периферійними пристроями*). До периферійних належать пристрої, які виконують функції підготовки даних і зберігання великих обсягів інформації, введення, виведення (*ПЗП, документування результатів проектування, пристрої машинної графіки, дисплеї, пристрої мовного спілкування конструктора з ОБС та ін.*). Вони перетворюють дані з однієї форми подання в іншу, не змінюючи їх змісту.

Основу загальносистемного програмного забезпечення ОБС становить **операційна система (ОС)** – комплекс системних керуючих і обробляючих програм, які призначені для забезпечення найбільш ефективного використання всіх ресурсів ОБС і підвищення зручності роботи з нею. Операційна система

здійснює планування і контроль виконання всього обчислювального процесу.

Залежно від класу ЕОМ і виду ОС при автоматизованому проектуванні реалізуються **однопрограмні** або **мультипрограмні** режими роботи ОБС. При однопрограмному режимі роботи ОБС у систему завантажується і виконується тільки одна програма, що забезпечується найпростішими ОС ЕОМ індивідуального використання (*на рівні персонального робочого місця конструктора*).

При мультипрограмному режимі роботи (*рисунок 4.7*) у системі містяться декілька програм, які виконує центральний процесор (*ЦП*) по черзі повністю або по частинах шляхом переходів від виконання одних програм до виконання інших залежно від наявної ситуації в ОБС.

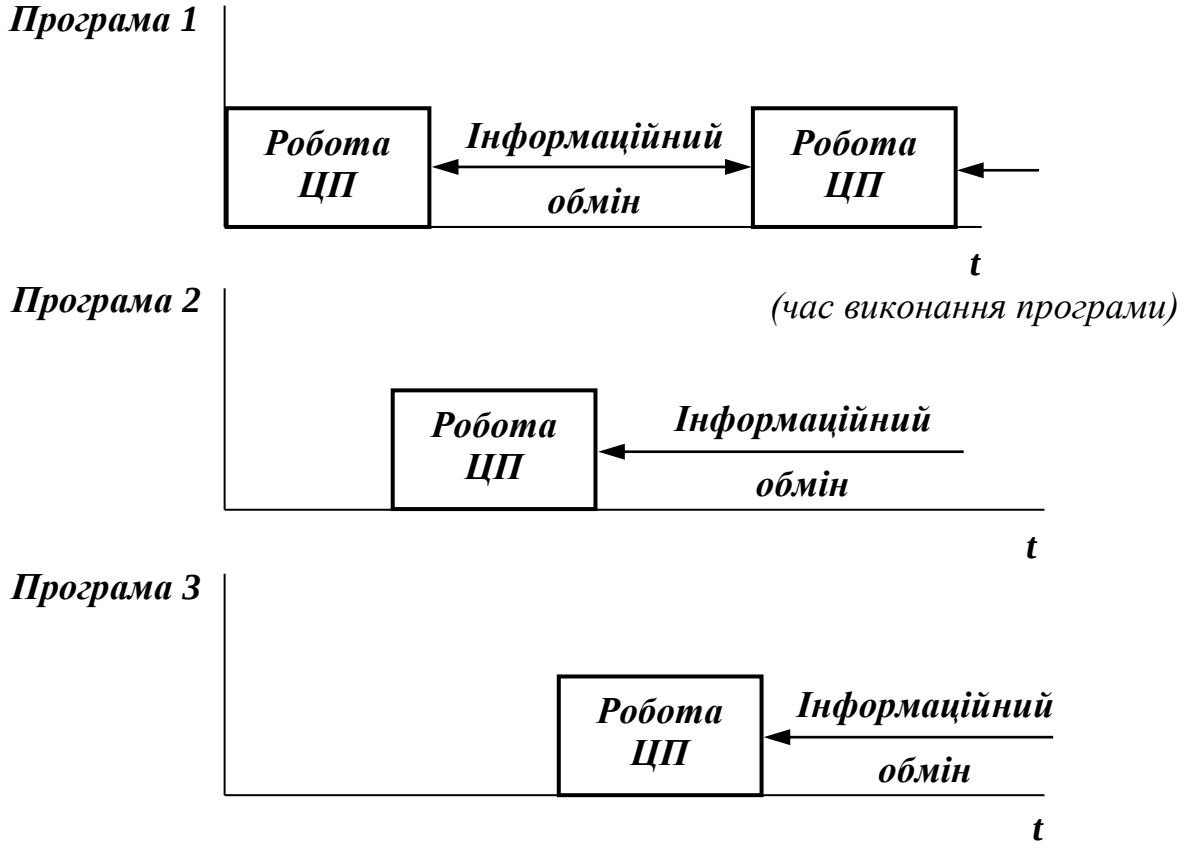


Рисунок 4.7 – До мультипрограмного режиму роботи обчислювальної системи САПР

При такому режимі роботи забезпечується більш раціональне використання всіх обчислювальних ресурсів (*ЦП,*

ОЗП, ПЗП). Якщо при виконанні першої програми виникає необхідність інформаційного обміну, то замість переходу в режим очікування ЦП переключається на другу програму і виконує її до виникнення аналогічної ситуації, і так далі.

У прив'язці до особливостей виконання програм при мультипрограмному режимі роботи ОБС реалізуються **режими пакетної обробки задач проектування і колективного доступу.**

У режимі **пакетної обробки** задачі упорядковуються в одну чи декілька черг, з яких послідовно вибираються для виконання. У режимі **колективного доступу** за рахунок квантування машинного часу кожна задача може ставитися відповідним користувачем на виконання в довільний момент часу. По закінченні виділеного кванта часу процесор переключається на іншу задачу або (*залежно від ситуації в ОБС*) продовжує виконання перерваної. Обчислювальні системи, що забезпечують колективний доступ з квантуванням машинного часу отримали назву **ОБС із розділенням часу.**

Поряд з ними в САПР використовують обчислювальні системи, які працюють у **режимі (масштабі) реального часу.** У таких системах при взаємодії користувача з ОБС забезпечується потрібна швидкість двостороннього інформаційного обміну, що має важливе значення при реалізації режимів **прямого контакту конструктора з ОБС САПР**. На відміну від пакетної обробки задач такі режими передбачають можливість безпосередньої участі і впливу конструктора на процес проектування, що позитивно позначається на формуванні раціональної стратегії оптимізаційного конструювання, зменшенні термінів і витрат на розробку нових ТЗ.

Розглядувані режими взаємодії конструктора з ОБС, які працюють у масштабі реального часу, прийнято називати **діалоговими режимами (ДР)**. При функціонуванні САПР використовуються **пасивні й активні (інтерактивні) ДР.**

У **пасивному** ДР ініціатива діалогу належить ОБС, яка за допомогою відповідних засобів призупиняє процес проектування в потрібних місцях (*програмних модулях*) і надсилає звернення ЕОМ до конструктора у вигляді **запитів, інформаційних повідомлень, підказок**. При цьому запити потребують обов'язкової реакції (*відповіді*) конструктора. Вони

використовуються у випадках, коли виникає необхідність у введенні додаткових даних або у виборі з обмеженої множини (*«меню» на екрані АЦД*) варіанта подальшого проектування. Інформаційні повідомлення використовуються для передачі конструктору, як правило, проміжних результатів (*відомостей про стан*) рішення окремих задач конструювання і не потребують обов'язкового реагування. Підказки бувають у випадках, коли дії конструктора помилкові (*наприклад порушуються формальні правила мови*).

В **активному** ДР забезпечується двостороння ініціатива початку діалогу – можливості переривання процесу автоматизованого проектування мають і ЕОМ і конструктор. У спрощеному уявленні діалог (*сеанс взаємодії*) відбувається на двох рівнях. На першому (*верхньому*) рівні конструктор вводить до ОБС завдання на виконання певної проектної процедури чи операції. На другому рівні ОБС, отримавши завдання, надсилає запити до конструктора з метою отримання необхідних даних, після чого реалізує відповідні проектні модулі та інформує замовника про отримані результати.

Активні ДР забезпечують найбільш ефективну взаємодію конструктора з ОБС, особливо при вирішенні складних задач оптимізаційного проектування і конструювання ТЗ. Важко переоцінити роль активних ДР у розробці й автоматизованому оформленні графічної конструкторської документації (*КД*). Особливо це стосується **креслярської КД** (*компонувальні і складальні креслення вузлів і агрегатів, робочі креслення деталей ТЗ*), яка може оформлюватися на різних носіях (*паперових, магнітних та ін.*) за допомогою сучасних технічних засобів машинної графіки відповідно до вимог єдиної системи конструкторської документації.

Для скорочення обсягів графічних робіт і підвищення продуктивності оформлення КД діалогові програмні системи передбачають використання **методів креслення-заготівки** і **надлишкового (*комплексного*) креслення**.

Метод креслення-заготівки передбачає отримання робочих креслень деталей на основі використання відповідних креслень-заготівок, що розроблені для визначених класів деталей і включені до БД ПІМГ. **Метод надлишкового креслення**

(**метод комплексного креслення, комплексної деталі**) передбачає опис певного класу деталей у вигляді сукупного геометричного об'єкта з надлишковими конструкційними елементами, розмірами, технічними умовами на виготовлення.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1 Мороз В. І., Братченко О. В., Ліньков В. В. Основи конструювання і САПР : навч. посіб. Харків : ПП видавн. «Нове слово», 2003. 194 с.

2 Мороз В. І., Братченко О. В., Астахова К. В. Основи конструювання і САПР технічних засобів залізничного транспорту : навч. посіб. Харків : УкрДАЗТ, 2009. 136 с.

3 Мороз В. І., Братченко О. В., Логвіненко О. А. Основи конструювання і САПР: Елементи сучасної методології автоматизованого проектування : конспект лекцій з дисц. «Основи конструювання і САПР». Харків : УкрДАЗТ, 2014. 34 с.

4 Мороз В. І., Братченко О. В., Логвіненко О. А. Основи конструювання і САПР: Математичне моделювання при проектуванні і конструюванні технічних засобів : конспект лекцій з дисц. «Основи конструювання і САПР». Харків : УкрДАЗТ, 2014. 49 с.

5 Сиротинський О. А. Основи автоматизації проектування машин : навч. посіб. Рівне : УДУВГП, 2004. 252 с.

6 Двигуни внутрішнього згоряння : Серія підручників. Т.4. Основи САПР ДВЗ / за ред. проф. А. П. Марченка, засл. діяча науки України проф. А. Ф. Шеховцова. Харків: Видавн. центр НТУ «ХПІ», 2004. 428 с.